

Luz del confín del Universo

El Universo y sus inicios

Rudolf Kippenhahn

Biblioteca
Científica
Salvat

Luz del confín del Universo

El Universo y sus inicios

Rudolf Kippenhahn

SALVAT

Versión española de la obra original alemana *Licht vom Rande der Well*, publicada por Deutsche Verlags-Anstalt de Stuttgart

Traducción: Miquel Muntaner

Diseño de cubierta: Ferran Canes / Montse Plass

Escaneado: doctorwho1967.blogspot.com
Edición digital: Sargont (2017)

ISBN: 84-345-8880-3 (Obra completa)
ISBN: 84-345-8960-5 (Volumen 80)
Depósito Legal: B-990-1995
Publicada por Salvat Editores. S.A.. Barcelona
Impresa por Primer, i.g.s.a. Enero 1995
Printed in Spain

ÍNDICE

A Johanna, que me ayudó
cuando más lo necesitaba

PRÓLOGO

Creo que me ahogaré si no consigo arrancarme de los pulmones este objeto que me han metido a través de la tráquea. Es la misma sensación que tendría si me hubiesen hincado una flauta en la garganta. Luego la voz femenina que me guía en la oscuridad: «¡Respire tranquilamente!», y todo empieza de nuevo. «Le voy a dar oxígeno» dice ella, y yo espero que a través de la flauta entre algo en los pulmones, algo que me recuerde prados alpinos jugosos y verdes. Pero lo que de repente sale tiene el mismo sabor que el aire de un viejo balón de fútbol.

Me parece que las cosas no van como debieran. La operación tenía que haber empezado hace rato, en cambio lo único que ahora les preocupa es anestesiarme. No puede haber pasado nada importante. Estamos todavía como antes, cuando de acuerdo con los preceptos legales me informaban sobre las posibles consecuencias: interrupción de la respiración, porque la intervención se ha de concentrar en un punto cercano al centro respiratorio, la posibilidad de que quede tullida la mitad de mi cuerpo y la parálisis segura del lado izquierdo de mi rostro.

Oigo hablar a los médicos, los ayudantes y las enfermeras. No parece que lo que dicen tenga ningún sentido para mí. Pero de repente todo se aclara: ¡No están intentando anestesiarme: me están despertando!

Mientras mantenga cerrados los ojos continuaré solo en la oscuridad. O sea que han extraído el tumor de mi cabeza y todavía estoy vivo. No siento ningún dolor. Parece que mientras tanto han retirado la flauta insertada en mis pulmones. Me habían informado ya de antemano que se trataba de un tumor benigno. Voy a contar a todo el mundo que por primera vez alguien ha encontrado algo benigno en mi cabeza. Debería sonreír. Pero me doy cuenta de que mi boca ya no me obedece. Compruebo inmediatamente mis manos. A Dios gracias los

pulgares y los demás dedos se mueven uno por uno. Tengo paralizada la mitad izquierda de la cara, y esto me impedirá dar clase y pronunciar conferencias, pero podré trabajar de nuevo con la máquina de escribir. Ahora voy a abrir los ojos.

El libro cuyo destino se decidió en este instante de un día de marzo de 1982 en la sala de cuidados intensivos de una clínica de Munich tuvo su origen en las conferencias del año anterior, que en el semestre de invierno de 1981/82 había recopilado para un curso de oyentes de todas las facultades de la Universidad Ludwig-Maximilian de Munich. Tenía a punto un grueso archivador Leitz lleno con el manuscrito, cuando los médicos me apartaron de la circulación. Más tarde el trabajo con este texto se convirtió en una medida de mi recuperación. Conseguí convertir la escritura en el puente con que salvaría el tiempo necesario para regresar a la investigación. Esto creó una relación con el presente libro mucho más intensa que la de los libros anteriores.

A pesar de la distinta temática, no siempre ha sido fácil evitar en el texto actual solapamientos con mi libro anterior sobre la vida de las estrellas[1]. Confío de todos modos haberlo conseguido bastante en cierta medida. Ambos libros se completan mutuamente, pero cada uno forma un todo independiente.

Este libro, como el anterior, está dedicado a personas cultas no especializadas. He utilizado a menudo los sueños del señor Meyer para que la materia sea lo más comprensible posible. El padrino es en este caso Mr. Tompkins[2]. Lo inventó el físico George Gamow, que deseaba explicar a sus lectores ideas complicadas de la física moderna. El señor Meyer y Mr. Tompkins se encuentran en dos de mis sueños, lo cual aprovecho para dirigir mis respetos al gran Gamow, a quien por desgracia no pude conocer personalmente. El sueño del señor Meyer sobre el espectro electromagnético del capítulo 2 se inspira en una historia de un libro popular de física que me impresionó en mi

---

[1] *Cien mil millones de soles*. Salvat Editores. S. A.. Barcelona 1993.

[2] George Gamow. *Mr. Tompkins'seltsame Reise durch Kosmos und Mikrokosmos*. Braunschweig 1980.

juventud. En varios lugares me he visto obligado a simplificar nociones complicadas en bien de la comprensibilidad. Espero que mis colegas me lo perdonarán.

Fue de gran ayuda en este trabajo la hospitalidad del Observatorio de Bamberg con su buena biblioteca, a la que felizmente no se puede llamar por teléfono desde el exterior. Doy las gracias a todos los colaboradores de este instituto. Más tarde, amigos y colegas me han ayudado a eliminar errores y faltas textuales. Alfred Behr, Gerhard Börner, Wolfgang Duschl, Jürgen Ehlers, Peter Kafka, Gustav Tammann, Hans-Heinrich Voigt y Richard Wielebinski han corregido algunos capítulos. Wolfgang Duschl leyó además todo el texto y propuso muchas correcciones. Mi amigo el matemático de Gotinga Hans Ludwig de Vries, repasó conmigo el texto en todos sus detalles y ha propuesto muchas mejoras. Es culpa mía si todavía faltan otras correcciones.

Ha jugado un papel importante en la realización del libro mi esposa, que siempre me ha animado a escribir. Doy las gradas a Cornelia Rickl, que pasó a máquina mi primera redacción convirtiéndola en un manuscrito utilizable, y que juntamente con Rosita Jurgeleit introdujo mis numerosas y a menudo repetidas correcciones.

Agradezco a la dibujante Jutta Winter y a los colaboradores de Deutschen Verlags-Anstalt su ayuda y el apoyo prestado en la realización de la obra.

RUDOLF KIPPENHAHN

INTRODUCCIÓN

Los cosmólogos se equivocan a menudo, pero nunca los tortura la duda.

YAKOV B. ZELDOVICH

Quizá nada de esto sea cierto. Yo intento describir en este libro el nacimiento y el estado actual de todo el Universo. Escribo pues sobre la ciencia llamada *cosmología*. ¿Pero de dónde saco yo, de dónde sacan mis colegas el valor suficiente para dar lecciones sobre lo supremo, sobre el ámbito más grande posible del Universo material? ¿Hasta qué punto es seguro el tema que quiero tratar ahora? ¿No podría ser todo distinto de lo imaginado?

Cuando nos ocupamos de procesos que tienen lugar a nuestro alrededor, siempre que pertenezcan a la naturaleza inanimada, nos sentimos sobre suelo seguro. Si tiramos una piedra caerá de acuerdo con las leyes de la caída conocidas desde Galilei, y si alguien duda de ellas que tire la primera piedra que tenga a mano. El experimento le demostrará que las leyes de la caída libre son correctas. Las mismas reglas determinan el punto de caída del obús disparado por un cañón. Este apartado de la mecánica se llama *balística*. Conocemos con mucha exactitud todas sus leyes, porque los experimentos correspondientes pueden repetirse con gran facilidad. En condiciones iguales se desenvuelven de modo igual. No hay motivos para dudar de un obús disparado[3].

---

[3] La historia del mundo hubiera seguido un curso muy distinto si las leyes de la balística sólo fueran válidas con una cierta probabilidad y no de modo seguro, como sucede con las formulaciones de la mecánica cuántica. En la II Guerra Mundial habría que haber previsto que una parte de las granadas disparadas por la artillería alemana sobre Leningrado podrían describir un arco en el aire y salir en dirección a Berlín. Las bombas tiradas sobre Dresden quizá sólo hubiesen caído con una cierta probabilidad sobre el lugar previsto por la balística y una pequeña porción de ellas se hubiera independizado durante la

Incluso al estudiar sistemas de la naturaleza mucho más complicados, por ejemplo los organismos vivientes, podemos comprobar experimentalmente si son correctas o no ciertas regularidades que deducimos de las observaciones. Si motivos de orden ético nos impiden proceder así, por ejemplo experimentar con seres humanos, podemos contar con la ayuda de ciertos procesos que acontecen sin nuestra intervención. Cuando los médicos observan el curso de distintas enfermedades en los mismos órganos de varias personas pueden descubrir las regularidades que rigen el funcionamiento de nuestros cuerpos.

Pasemos ahora a la naturaleza inanimada del Universo. No podemos experimentar con el Sol. Podemos observarlo y estudiarlo con todos nuestros aparatos, pero no podemos tocarlo. Somos demasiado pequeños, tenemos demasiada poca importancia para poder hacer cambios en él. Es imposible observar lo que sucedería si vertiéramos unos cuantos trillones de toneladas de hidrógeno sobre su superficie o si le quitáramos el hidrógeno y lo llenáramos de helio. No disponemos de la energía necesaria para mover tales masas, suponiendo que supiéramos sacar estas cantidades inconmensurables de algún lugar que no fuera las estrellas, a las cuales no podemos llegar. Tenemos que aceptar el Sol tal como es.

Pero somos afortunados. La misma naturaleza realiza para nosotros los experimentos que nosotros somos incapaces de efectuar. En el espacio hay miles de millones de soles, soles que se parecen al nuestro en casi todas sus propiedades, pero también hay soles que contienen más masa o menos masa que el nuestro. Hay estrellas que son más viejas que nuestro Sol y otras que son más jóvenes que él. Podemos pues estudiar esta multiplicidad de soles. No podemos experimentar con nuestro Sol, pero la naturaleza se ha ocupado ya de hacer sus experimentos y nos presenta en las estrellas más distintas un número inconmensurable de resultados. Esto nos permite entender las estrellas y por lo tanto el Sol, por lo menos en sus propiedades más importantes.

---

caída precipitándose algunas quizás hacia Londres, otras hacia Nueva York.

Todo es distinto, sin embargo, cuando consideramos el Universo como un todo. Si no podemos tocar ni la superficie ni el interior de las estrellas, mucho menos podremos actuar sobre el conjunto del Universo. Nos gustaría desde luego construir rápidamente un Universo experimental que contuviera en el mismo espacio diez veces más galaxias que el Universo actual e investigar luego este Universo experimental como han investigado los astrónomos nuestro Universo auténtico. Pero el Universo se presta menos todavía que el Sol a este juego cósmico. La situación es peor, porque si bien la naturaleza nos ofrece una gran reserva de estrellas y nos inunda de material informativo sobre los experimentos en los que hace que surjan y desaparezcan diferentes estrellas, se muestra en cambio muy sobria y reservada sobre el Universo en su conjunto. Hay muchas estrellas, pero sólo hay *un* Universo. La naturaleza nos deja en la estacada, no experimenta para nosotros con el Universo.

El Universo es un espectáculo que se desenvuelve ante nosotros como una película proyectada una sola vez. No podemos intervenir en la acción. No hay repeticiones ni segundas partes que empiecen con una situación inicial algo cambiada, quizá con el joven amante algo menos joven que antes, de modo que veamos a los héroes actuar de modo distinto en situaciones distintas. Estamos sentados inermes e inmóviles en nuestro nido de gorrión contemplando una única secuencia de una película única que no nos recuerda nada de lo que estamos acostumbrados a ver en la Tierra o en el Universo de las estrellas. No podemos rebobinar la película para estudiar un detalle con mayor detenimiento. No podemos acelerar la película para ver su final. Y si somos incapaces de observar repetidamente el curso temporal de los hechos, tampoco sabemos muy bien qué significa realmente lo que estamos viendo. Vemos galaxias situadas en lo hondo del espacio, muy lejos de nuestro sistema de la Vía Láctea, pero no sabemos con precisión a qué distancia están. No sabemos hasta dónde puede alcanzar nuestra mirada en el espacio.

Paul W. Hodge, de la Universidad de Washington, en Seattle, en un artículo general sobre los diversos métodos existentes

para determinar la distancia de los objetos más lejanos del cielo, escribió con desánimo lo siguiente: «Quizá lo más razonable sería renunciar de momento a la empresa.» Hodge propone una serie de problemas importantes e irresueltos de la astronomía, que podrían abordarse en lugar del anterior y cuya solución pondría unas bases más sólidas para la medición del espacio cósmico más allá de nuestra Vía Láctea. «Pero», continúa diciendo, «la tentación de seguir adelante y de construir una escala de distancias para los espacios exteriores a la Vía Láctea era demasiado grande, y algunos de los mayores genios del siglo XX no pudieron resistirla.»

Sólo presenciamos una corta secuencia del drama cósmico. No lo vemos representado en distintas variaciones, y no siempre sabemos con certeza lo que estamos viendo. Y sin embargo, nos comprometemos a reconstruir toda la acción desde el principio al final.

¿De dónde sacamos las fuerzas? En primer lugar está la creencia de que la física que hemos aprendido en la Tierra es válida en todo el Universo. Sabemos con bastante precisión que la materia de las estrellas y que las estrellas como objetos individuales obedecen las leyes de nuestra física. En el interior de las estrellas el hidrógeno se transforma en helio creándose muchos elementos químicos más, tal como predice la física terrestre. Las mismas estrellas se mueven en las galaxias según determinan las leyes de nuestra mecánica. Incluso de las galaxias más lejanas recibimos radiación emitida por átomos de elementos químicos bien conocidos en la Tierra, tal como prescribe nuestra física terrestre. Aquellas estrellas no están formadas por materiales exóticos y desconocidos para nosotros; están formadas por los mismos elementos químicos que tenemos en casa, aunque sólo sea en cantidades minúsculas, la materia con la cual se han formado nuestros cuerpos. Si miramos hacia algún lugar apartado del Universo, sea cual fuere, en todas partes nos parecerá el Universo igual que aquí. Nuestra física no es puramente terrenal, no es válida únicamente para la Tierra, sino que parece tener una validez universal, es decir, que es aplicable a todas las partes del Universo.

Pero vayamos con cuidado. Lo que acabamos de decir significa que las regularidades aparentemente válidas para la Tierra, es decir, para un pequeño dominio del Universo, también son válidas para otros dominios parciales, por alejados que estén de nosotros, por ejemplo para las estrellas de otras galaxias. Sin embargo, los cosmólogos se han planteado como objeto de su investigación no dominios parciales del Universo, sino el Universo en su conjunto. Esta empresa es mucho más difícil. ¿Ha de obedecer también este todo a la física válida en sus dominios parciales?

Si queremos enfrentarnos con un objeto tan extraño como el Universo debemos estudiarlo en sus rincones más alejados. Se plantea entonces inmediatamente una pregunta que nos ha intrigado ya a todos: ¿Hasta dónde llega el Universo? ¿Con qué nos encontraríamos si avanzáramos por el espacio sin parar, siempre en la misma dirección? Es muy difícil imaginar que no existe ningún final, pero la idea de que el Universo tenga una frontera plantea todavía dificultades mayores. Pues inmediatamente surge la pregunta: ¿Qué hay más allá de esta frontera? ¿Un Universo de otra naturaleza o el espacio vacío? ¿Podemos saber algo de este otro Universo? ¿Observamos con los telescopios más potentes algún indicio que permita pensar en la existencia de una frontera cósmica? ¿Podemos con ayuda de estos instrumentos vislumbrar el lugar donde se levanta la muralla final que cierra el Universo? No necesitamos para ello ningún telescopio: a simple vista reconocemos ya una propiedad importante del Universo.

Es sabido que los astrónomos suelen precisar para sus trabajos costosos aparatos. Pero es bueno saber también que algunas observaciones astronómicas no cuestan nada y son, sin embargo, importantes e instructivas. A veces el obstáculo a superar no es el desarrollo de aparatos refinados y sensibles sino reconocer que lo que vemos no es evidente de por sí, que vale la pena interrogarse sobre lo que uno acaba de ver. El cielo se oscurece al final de la tarde. ¡Quién habría de caer en la cuenta de que esto es una importante observación astronómica! No es evidente, por ejemplo, que el cielo nocturno deba ser negro. Es difícil reconstruir quién fue el primero en darse cuenta de que

este hecho podía enseñarnos algo. En el año 1823 el médico y astrónomo de Bremen Wilhelm Olbers (1758-1840) envió un breve trabajo a la redacción del «Astronomisches Jahrbuch». Desde entonces la reflexión que contenía el trabajo se llama *paradoja de Olbers.*

Quizás esta atribución no sea correcta, porque unos 80 años antes el astrónomo suizo Jean-Philippe de Loys de Cheseaux (1718-1751) escribió en un libro idénticas reflexiones, y Olbers conocía la obra. Sea cual fuere el nombre que le corresponda, he aquí la paradoja: Si el Universo estuviera lleno uniformemente y desde siempre de estrellas brillantes e inmóviles, al mirar nosotros en cualquier dirección del cielo veríamos de día y de noche las superficies de estrellas brillantes. El cielo entero estaría compuesto de muchos miles de millones de pequeños discos estelares, solapándose parcialmente, y todo el cielo sería brillante y resplandeciente como la superficie del Sol. Sin embargo el Universo es oscuro. La llegada de la noche nos demuestra cada día que el Universo no esté lleno uniformemente hasta el infinito y desde siempre de estrellas inmóviles. La explicación de este oscuro cielo nocturno permitirá descubrir una profunda propiedad de nuestro Universo.

Otra observación importante realizable a simple vista: Las estrellas no llenan el espacio de modo uniforme. La banda débilmente luminosa de la Vía Láctea nos revela ya este hecho, aunque el actual habitante de las ciudades sólo pueda comprobarlo de vacaciones en una noche clara y sin Luna. Estamos situados dentro de un enorme conjunto de estrellas que parecen estar suspendidas en el espacio vacío, y vivimos con el Sol y con los planetas en una isla de miles de millones de otros soles. Esta isla parece estar situada en un océano de espacio vacío, desierto y casi sin orillas.

Debemos primero investigar nuestros alrededores cósmicos si queremos comprender el Universo en su conjunto. Tenemos que explorar primero nuestra isla, como Robinson, para conocerla y quizás incluso comprenderla. Luego podremos dirigir nuestra atención a otras islas. Pero primero comencemos con nuestra isla, el sistema de la Vía Láctea.

Es el nido donde nacieron el Sol y la Tierra. En ella se crearon pues las condiciones para la existencia humana. ¿Cómo es la isla a la cual debemos lo que somos?

I. ANATOMÍA DE LA VÍA LÁCTEA

> SAGREDO (dudando en acercarse al telescopio): Siento como una especie de miedo, Galilei.
>
> GALILEI: Voy a mostrarte ahora una de las brillantes nebulosas de la Vía Láctea, blanca como la leche. Dime de qué está compuesta.
>
> SAGREDO: De estrellas, de innumerables estrellas.
>
> BERTOLT BRECHT. *La vida de Galilei*

La Vía Láctea divide la esfera celeste en dos mitades. A simple vista se nos aparece como una banda lechosa que corre sobre el firmamento estrellado, formando un círculo cerrado alrededor del cielo boreal y austral. El filósofo griego Demócrito dijo ya hacia el año 400 antes de nuestra era: «La Vía Láctea está formada por una gran multitud de estrellas muy pequeñas y apretadas que brillan conjuntamente y multiplican su luz debido a su densidad.» Demócrito no disponía de telescopio, por lo tanto, lo que dice no pudo verlo, sólo pudo suponerlo. Dos mil años después se supo que su hipótesis era correcta. Pero, para ello, hubo que inventarse primero el telescopio.

En agosto del año 1609, Galileo Galilei dirigió su pequeño telescopio hacia el cielo y vio que la Vía Láctea contenía innumerables estrellas individuales. Las manchas claras resultaron ser cúmulos de estrellas. En modernas fotografías del cielo parece a menudo que las estrellas estén muy apretadas, como si sus superficies estuviesen casi tocándose. Pero, en general, hay estrellas mucho más próximas a nosotros que otras. Las estrellas están separadas entre sí por grandes distancias y es sólo el hecho de observarlas en una misma dirección lo que parece situarlas unas al lado de otras. Pero aunque estén situadas más o menos a la misma distancia de nosotros en el espacio, sus distancias mutuas continúan siendo enormemente grandes. Es sólo su gran distancia a nosotros lo que les da esta proximidad

ficticia. La gran vastedad del sistema de la Vía Láctea nos hace creer que en él las estrellas están muy próximas unas a otras. Cuando tratamos con grandes distancias tenemos que hacemos primero una idea de lo que esto significa y utilizar una medida de referencia adecuada.

Las medidas en el espacio

No vamos a seguir de entrada el curso histórico y explicar cómo fue revelándose a pasos pequeños o grandes la estructura y la naturaleza del cuerpo que vemos en el cielo formando la zona de la Vía Láctea. Vamos a exponer en cambio nuestros conceptos actuales sobre el tema, sin detenernos de momento a explicar de dónde hemos sacado estos conocimientos.

Para describir el sistema estelar de nuestra Vía Láctea, de nuestra galaxia, y sobre todo para describir la extensión espacial de este objeto utilizaremos las tortuosas unidades de los astrónomos. Los astrónomos han conservado su propia unidad de longitud, en lugar de adaptarse a las unidades métricas convencionales. Su base es el *parsec*, abreviado pc. El parsec es muy superior a cualquier longitud corriente de la Tierra. Incluso el Sistema Solar con todas sus órbitas planetarias es demasiado pequeño para medirse con esta unidad de longitud. Hay que sumar 206.000 veces la distancia de la Tierra al Sol para tener un parsec. La palabra parsec es de origen artificial, y se ha formado uniendo *paralaje* y *segundo*. Estas dos palabras tienen relación con el método seguido para determinar la distancia a las estrellas fijas más próximas, como se explica en el apéndice C. No vamos a explicar aquí por qué los astrónomos han preferido esta unidad de longitud (los físicos siempre se han horrorizado de las unidades poco ortodoxas de los astrónomos). Basta ahora que nos hagamos una idea de la magnitud de esta unidad. Una estrella situada a 1 pc de distancia de nosotros en el espacio, está a 31 billones de kilómetros, es decir a 31 millones de millones de kilómetros. La luz que nos llega hoy de aquella estrella habrá estado en camino 3,26 años.

Esto nos lleva a otra unidad de longitud cósmica que los astrónomos utilizan para dar a los no especialistas una idea de las increíbles distancias de la astronomía: el *año luz*. Puede parecer que el nombre se refiera a un intervalo de tiempo. Pero un año luz es una distancia, el espacio que recorre la luz en un año. Un parsec equivale pues a 3,26 años luz. Recordemos que la luz recorre en cada segundo 300.000 kilómetros. Esta es casi la distancia de la Tierra a la Luna. Pero un año contiene 32 millones de segundos. Es decir, que un año luz será más de 32 millones de veces superior a la distancia de la Tierra a la Luna. Una vez introducido el año luz es fácil pasar a otras unidades de longitud, más cortas, pero menos utilizadas: el *mes luz,* el *día luz,* el *minuto luz* y el *segundo luz*. El Sol está a 150 millones de kilómetros de la Tierra, lo cual equivale a ocho minutos luz. Si el Sol se apagara repentinamente en un segundo, por ejemplo a las doce del mediodía, llegaría la oscuridad a nosotros al cabo de ocho minutos. Cuando se dirige con señales de radio el vuelo de sondas planetarias que operan en las proximidades de Marte, Júpiter o Saturno hay que tener en cuenta que la sonda reacciona a una señal después de minutos, incluso horas de la emisión de la orden, porque las señales de radio que se propagan con la velocidad de la luz necesitan todo este tiempo para llegar hasta el aparato. Se necesita el mismo intervalo de tiempo para que llegue a la Tierra la señal comunicando que la orden se ha cumplido. Una unidad de distancia basada en la luz es inconcebiblemente grande, es una unidad adecuada para las dimensiones del Universo. Lo que nosotros consideramos grande en la Tierra es tan pequeño que no sirve para medir el Universo. La mayor distancia que ha podido cubrir el hombre con sus propias fuerzas, la distancia a la Luna, apenas supera un segundo luz. Pero volvamos a las distancias mucho mayores de los espacios de la Vía Láctea.

El parsec es una unidad pequeña, por inconmensurable que pueda parecemos la distancia que mide. Tracemos alrededor de la Tierra (o mejor alrededor del Sol, que viene a ser lo mismo cuando se trabaja con parsecs) una esfera de 1 pc de radio, y veamos cuántas estrellas atrapamos en su interior. Desengañé-

monos: no hay ninguna estrella que esté tan próxima. La estrella fija más próxima, Próxima Centauri, situada en el cielo austral, está a 1,31 pc de nosotros. Es decir, que su luz tarda en llegar a nosotros cuatro años y tres meses. Si ampliamos la esfera con centro en el Sol a 6,45 pc, podremos atrapar en su interior un centenar aproximadamente de estrellas. Pero esta cifra es casi nada comparada con los miles de millones de estrellas que según las teorías actuales forman parte del encantador conjunto estelar de la Vía Láctea. Para describir nuestra galaxia necesitamos unidades todavía mayores. La mayoría de estrellas de la Vía Láctea están diez mil veces más lejos de nosotros que nuestra vecina Próxima Centauri. Se tiene así el *kiloparsec* (kpc), mil pc, es decir, 3.260 años luz. Las cien estrellas más brillantes del cielo nocturno están todas a menos de tres cuartos de kpc de nosotros. Creemos que nuestro Sistema Solar se desplaza por el espacio a unos 10 kpc de distancia del conjunto de estrellas que forman el centro de la Vía Láctea. Esta distancia es de 33.000 años luz. Un rayo de luz o una onda de radio procedente del centro galáctico fueron emitidos cuando en la Tierra nos dedicábamos todavía a pintar búfalos en las paredes de las cavernas. Pero en la Vía Láctea todavía hay estrellas que distan de nosotros quizás unos 30 kpc. Si el pc es la unidad adecuada para describir las distancias que separan las estrellas vecinas unas de otras, el kpc es la unidad adecuada para medir las distancias dentro de la Vía Láctea.

Pero el Universo no se acaba con las estrellas de la Vía Láctea, ni mucho menos. Sabemos desde 1924 que el sistema estelar de la Vía Láctea es uno más de un conjunto incontable de otros sistemas. Es también una galaxia por ejemplo la *nebulosa de Andrómeda* (fig. 1-1). Aunque está a 670 kpc de nosotros, es uno de los sistemas estelares más próximos llamados por su forma *nebulosas espirales*. Los sistemas estelares situados como el nuestro en el espacio y de los cuales sólo una parte presenta bellas espirales se llaman galaxias.

Si queremos describir el Universo en los lugares donde hay galaxias, tenemos que ampliar de nuevo nuestra unidad de longitud. Mil kpc, es decir un millón de pc, constituyen un *megaparsec* (Mpc). La nebulosa de Andrómeda está pues a 0,67

Mpc de nuestro sistema galáctico. Sin embargo, conocemos una galaxia que está a 4.000 Mpc de distancia. Todavía captamos luz de objetos situados a más de 5.000 Mpc de distancia, es decir a unos 16.000 millones de años luz. Compárese esta cifra con la edad de 4.500 millones de años que estimamos que tienen el Sol y la Tierra. La luz que recibimos hoy de aquellos objetos lejanos fue emitida cuando ni siquiera existía nuestro planeta.

Disponemos ya de unidades de longitud que nos permiten no sólo medir las distancias entre las estrellas, sino también medir la galaxia de un extremo a otro y las distancias que separan unas galaxias de otras, incluso medir el Universo entero hasta el límite de la perceptibilidad. Pero de momento nos quedaremos en nuestra patria, diminuta en comparación con el Universo entero, pero para nosotros incomprensiblemente enorme: el sistema de la Vía Láctea.

Voy a servirme ahora de un medio al cual recurriré con frecuencia cuando tenga que representar de modo plástico hechos de tipo físico y astronómico. A menudo el tamaño de nuestros cuerpos y el hecho de vivir pegados a la superficie de un planeta minúsculo impiden representamos adecuadamente la inmensidad del Universo. A menudo la velocidad con que tienen lugar los procesos en nuestro cuerpo y el corto intervalo temporal entre el nacimiento y la muerte nos impiden comprender el transcurso del tiempo en el Universo. Pediré, pues, al lector que me acompañe en el sueño de un personaje inventado, el señor Meyer. Confío transmitir así en cierta medida la sensación de sobrecogimiento que siente el lector de la obra de Jules Verne *Veinte mil leguas de viaje submarino,* cuando con el capitán Nemo mira a través de la ventana del Nautilus. Quizás le ayude, como al lector de los sueños de Mr. Tompkin, de George Gamow, a captar de modo más inmediato hechos de difícil representación.

El señor Meyer resuelve un enigma

El señor Meyer se había pasado un día entero ordenando su biblioteca. Se había hecho tarde y estaba tan cansado que no tenía apenas ganas de leer. Se llevó pues a la sala de estar un libro con ilustraciones astronómicas que quería ojear mientras bebía un vaso de vino. Al abrirlo su vista se detuvo en una brillante foto de una nebulosa espiral. Vio la hermosa estructura espiral que le recordaba los remolinos que se formaban en la superficie del agua de su bañera cuando quitaba el tapón. Miró fijamente la espiral y de pronto tuvo la sensación de que la imagen ya no estaba en la mesa de su sala de estar sino sobre una mesa metálica, bajo una lámina transparente. Le parecía además que se había quedado atado a su butaca. Pero no, no era su butaca, era una silla de aluminio que tenía las patas atornilladas al suelo. Tampoco estaba exactamente en la sala de estar de su casa. La botella de vino había desaparecido. El señor Meyer estaba sentado dentro de un pequeño camarote metálico, con todo el espacio disponible atiborrado de aparatos científicos. Había visto ya algo parecido, en la televisión: ¡Estaba en una nave espacial! De hecho cuando miró hacia la redonda ventana no vio las luces de su ciudad natal. En el exterior dominaba una oscuridad absoluta, mirara hacia donde mirara. Pero algo no cuadraba, y no sabía exactamente qué.

Mientras intentaba descubrirlo se abrió en un lugar de la pared una escotilla circular y se metió de cabeza por ella un hombre que entró flotando después de darse impulso con las manos en el borde de la escotilla. Llevaba un ajustado traje espacial de color plateado brillante, y el señor Meyer recordó de repente que él llevaba puesto su batín.

—¿Todo en orden? —le preguntó el hombre, y el señor Meyer asintió con la cabeza, para no provocar más preguntas. Pero no le sirvió de nada porque el desconocido continuó preguntando—: ¿Sabe dónde estamos?



Fig. 1-1. La galaxia de Andrómeda está a tal distancia de nosotros en el espacio que su luz tarda en llegar unos dos millones de años y sus estrellas se funden en la imagen dando una nebulosa ovalada. La distancia de la nebulosa de Andrómeda en la unidad de longitud explicada en el texto es de 670 kpc. Todas las estrellas individuales que pueden reconocerse en la fotografía están relativamente próximas a nosotros en el primer plano de nuestra galaxia, la Vía Láctea. Pueden verse en las proximidades inmediatas de la galaxia de Andrómeda dos galaxias enanas, la mancha elíptica difuminada de la parte inferior izquierda de la fotografía y la mancha casi circular del borde superior derecho de la nebulosa. Hablaremos de ellas en el capítulo 9 (pág. 232). (Fotografía: Observatorio Karl-Schwarzschild, Tautenburg, República Democrática Alemana.)

Ya está, pensó el señor Meyer, no tengo ni idea de cómo he llegado, triste de mí, a esta nave espacial, y me piden ahora que dé una determinación astronómica de nuestra posición. Fuera

no puede verse ninguna estrella... Se detuvo petrificado. ¡Claro! Esto era lo que no cuadraba: no se veía ninguna estrella en el exterior. Desde una nave espacial en ruta hacia la Luna o hacia un planeta de nuestro Sistema Solar, las estrellas del cielo deberían tener exactamente el mismo aspecto que en una noche clara en la Tierra. Y sin embargo, allí no había estrellas. Aunque la nave siguiera una trayectoria por fuera de nuestro Sistema Solar entre las estrellas de la Vía Láctea, deberían verse estrellas en el cielo. ¿Está la nave dentro de una espesa nube de polvo que oculta la luz de las estrellas y deja el cielo sin astros? ¿O se ha alejado tanto de casa la nave espacial que está ya en el espacio vacío, lejos de la Vía Láctea, lejos de todas sus estrellas? Desde la Tierra vemos a simple vista estrellas en el cielo únicamente porque nosotros y nuestro Sistema Solar nos encontramos entre los cien mil millones de estrellas que componen el sistema de la Vía Láctea.

—¿Sabe usted dónde estamos? —repitió con insistencia el astronauta. El señor Meyer recuperó finalmente el valor necesario para dar la respuesta correcta, quizá porque se avergonzaba de su batín. Se puso a pensar esforzadamente: ¿En el interior de una nube de polvo o a gran distancia de la Vía Láctea? Una de las dos respuestas era la correcta. ¿Pero cuál?

Se despegó de su asiento y flotó cuidadosamente por el espacio hasta la ventana. Para ello tuvo que agarrarse con manos y dedos a los diversos rincones, bordes y puntales. Ahora podía observar un sector bastante mayor del cielo. No pudo ver ninguna estrella, ni siquiera cuando el astronauta apagó la iluminación de la cabina. ¿Estaba pues la nave espacial en el interior de una nube opaca de polvo? Mientras tanto sus ojos se acostumbraron a la oscuridad y al final el señor Meyer pudo ver que el cielo no era totalmente oscuro. En dos zonas de la profunda negrura del cielo pudo distinguir dos manchas nebulosas pequeñas y más claras.

Pero esto significaba que la nave espacial no estaba perdida en la oscuridad de una nube de polvo cósmico; había algo que ver. Ahora sus pensamientos se aceleraron. La nave espacial está muy lejos de nuestro sistema galáctico, lejos de sus estrellas, y las dos nubecitas son sistemas galácticos. Una de ellas

es quizás el nuestro. Estamos tan lejos de ella que los mil millones de estrellas de este objeto no pueden distinguirse individualmente. Sólo se distingue su totalidad en forma de nubecilla borrosa, se dijo el señor Meyer. El astronauta plateado se acercó flotando a la ventana con su rostro de sarcástica interrogación.

—Estamos muy lejos de la Vía Láctea —dijo el señor Meyer. La expresión sarcástica desapareció. El astronauta asintió con la cabeza y el señor Meyer pudo captar en su rostro un indicio de reconocimiento.

Volando hacia la Vía Láctea

El astronauta mientras miraba por la ventana se puso a hablar:

—Estamos en el espacio que separa los sistemas estelares. Es un desierto vacío, porque la distancia entre dos galaxias suele ser de varios Mpc. El entero Universo está casi vacío, porque las galaxias están solas y separadas, en general, unas de otras por distancias que suelen ser muy grandes en comparación con sus diámetros. Nuestra nave espacial dispone de instrumentos de observación de todo tipo, desde telescopios ópticos hasta radiotelescopios, receptores de rayos X y contadores Geiger. Los instrumentos pueden captar y medir rápidamente partículas materiales en movimiento, la llamada radiación de partículas. Estamos a unos 1.000 Mpc de la Vía Láctea[4]. Allí puede verla. —El astronauta se fue a un lugar de la pared de

---

[4] Si queremos desplazamos imaginariamente con una nave espacial entre las galaxias con velocidad suficiente para poder llegar de una galaxia a otra en el transcurso de nuestra vida, esta velocidad ha de ser muy grande. Pero desde Einstein los físicos saben que es físicamente imposible llevar un cuerpo a una velocidad que supere la de la luz. Si la nave espacial donde ha ido a parar el señor Meyer se mueve entre las galaxias en tiempos relativamente breves, vamos a ignorar que se necesitan para ello velocidades superiores a las de la luz. En nuestra historia esto sucede gracias a que el señor Meyer experimenta una especie de salto de la conciencia. Nuestra única intención ha sido describir de algún modo la estructura del Universo. Y en definitiva todo ha sido un simple sueño.

donde sobresalía un pequeño apoyo que recordaba el extremo invertido de un pequeño telescopio— Mire aquí, a través del ocular. El telescopio está apuntando exactamente a la Vía Láctea.

El señor Meyer miró por el aparato. Sus ojos se habían ya acostumbrado a la oscuridad pero no vio casi nada. En el centro del campo de visión sólo se distinguía una zona algo más clara.

—¿Es esto nuestro sistema galáctico? —preguntó con incredulidad. El astronauta asintió con la cabeza y el señor Meyer miró con mayor detalle la mancha del telescopio. Sólo veo que la mancha es algo más clara que el fondo negro, dijo para sí. Éstos son pues los miles de millones de estrellas de nuestra galaxia, ninguna de las cuales consigo reconocer aquí individualmente. En algún lugar de esta nubecilla hay una minúscula estrella, el Sol, y a su alrededor gira la Tierra como una mota de polvo. Y en algún lugar de esta mota de polvo está mi cama, donde ahora debería estar yo durmiendo.

—Desde aquí nuestra galaxia apenas puede distinguirse —dijo el astronauta— De hecho estamos a tres mil millones de años luz de distancia. Se ve únicamente como un diminuto disco nebuloso recortado sobre un fondo totalmente oscuro. En las distintas direcciones del espacio vemos muchos disquitos más de este tipo, algunos son mayores y más claros que nuestra galaxia (figs. 1-2 y 1-3). Desde aquí la vemos más o menos como veríamos una moneda pequeña situada a 600 metros de distancia; vamos a acercarnos a ella.

El astronauta marcó algunos números en un teclado de ordenador. En la conciencia del señor Meyer pasó algo raro. No era exactamente que se desmayara, tampoco se quedó dormido, ¿cómo podía hacerlo si ya dormía?, pero durante un instante todo se hizo tan irreal... Pero en el instante siguiente todo volvió a su lugar y el astronauta hizo señas al señor Meyer para que se acercara al telescopio. Ahora la mancha clara había aumentado sensiblemente de tamaño. El cuerpo, que tenía una forma elíptica, no brillaba de modo uniforme. Mirándolo con mayor detenimiento podían observarse bandas más claras que parecían extenderse en espiral hacia fuera desde el centro. Entre ellas, en los espacios situados entre estos brazos espirales,

el disco parecía emitir menos luz. Tampoco el color era uniforme. Los brazos espirales parecían de color más bien blanco azulado, pero la zona central de donde parecían partir los brazos espirales era amarillenta.

En el cúmulo de Virgo

El astronauta acababa de apretar de nuevo los botones de control del ordenador, y cuando el señor Meyer pudo pensar de nuevo con claridad el panorama exterior había cambiado totalmente. Antes el cielo era oscuro con unas pocas manchas nebulosas apenas visibles, pero ahora la nave espacial estaba en medio de galaxias, algunas de las cuales eran tan grandes como la Luna llena en el cielo. La mayoría tenían formas espirales, entre ellas había otras más pequeñas y de menor luminosidad que no presentaban ninguna estructura, y algunas muy grandes que flotaban en el espacio como óvalos luminosos, desprovistas de cualquier estructura espiral. El señor Meyer pudo observar que algunas tenían una franja; eran galaxias con una faja oscura en el vientre.

—Estamos en el centro de un cúmulo galáctico —dijo el astronauta—. Este cúmulo visto desde la Tierra aparece en la constelación de Virgo, por ello los astrónomos lo llaman el *cúmulo de Virgo*. En este cúmulo se han reunido 2.500 galaxias. Nosotros estamos ahora en la región de máxima densidad. Aquí las galaxias están separadas en promedio únicamente por 100 kpc de distancia. Recuerde que la distancia de la nebulosa de Andrómeda a la Vía Láctea es siete veces superior.

El señor Meyer miró hacia fuera y en cualquier dirección pudo ver galaxias más débiles y pequeñas entre las galaxias brillantes.

—Sin embargo, el espacio entre las galaxias no está vacío aquí —dijo el astronauta— En cualquier dirección hacia la que dirija mis aparatos receptores recibo rayos X emitidos por masas calientes de gas, que en este cúmulo galáctico llenan el espacio entre las galaxias. No podemos verlas porque no emiten luz visible. Ahora voy a enseñarle la joya del cúmulo de Virgo.

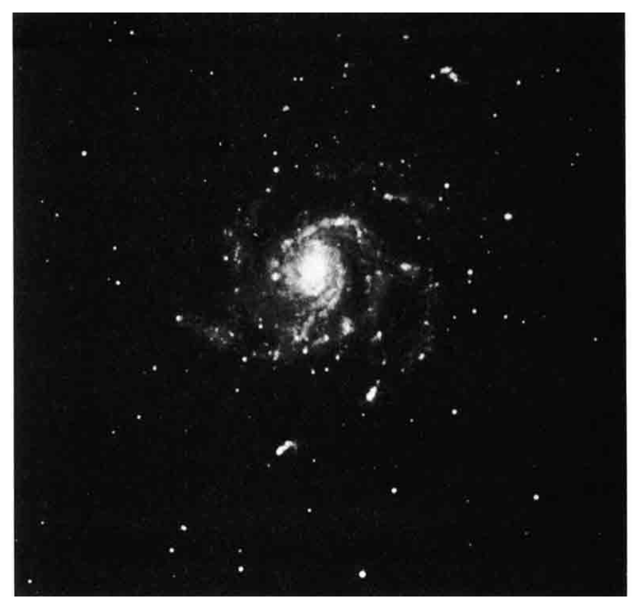


Fig. 1-2. El disco de la galaxia M101 se observa perpendicularmente desde arriba. Esta galaxia está a casi 4 Mpc de nosotros y cada segundo se aleja 440 kilómetros. M101 recuerda un molinillo de juguete y tuvo un papel importante en el famoso debate de los universos islas (ver el capitulo 5) (Fotografía: K. Birkle, H. Lingenfelder, Centro Astronómico Hispano-Alemán.)

El astronauta apretó de nuevo los botones de mando y de pronto se hizo luz en el exterior. El señor Meyer, que estaba mirando en aquel momento al astronauta, se volvió de nuevo hacia la ventana. El cielo se había llenado con una mancha brillante que ocupaba un espacio enorme. Estaban muy cerca de una galaxia de extensión increíble. La mancha brillante presentaba una luz rojiza. Pero lo que fascinó al señor Meyer era un dardo azul como de soplete que salía del centro de la mancha, tan largo que sobresalía del borde de la mancha rojiza y se adentraba en la honda negrura del cielo. El rayo azul parecía mantenerse inmóvil en el espacio como una llama congelada.

No era uniforme. El señor Meyer descubrió en él nudos claros ensartados como un collar de perlas (fig. 1-3).

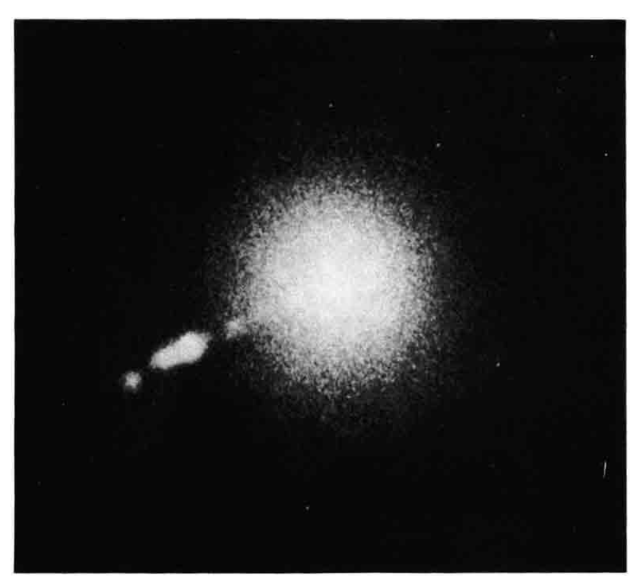


Fig. 1-3. La galaxia M87 está en el cúmulo galáctico de la constelación de Virgo. Se aleja de nosotros junto con las galaxias de este cúmulo 1.200 km cada segundo. M87 se cuenta entre las galaxias elípticas (ver pág. 235) y no presenta ninguna estructura espiral. Sin embargo, la materia sale al exterior desde su región central en forma de rayo delgado, indicación de que en el centro de la galaxia se liberan enormes cantidades de energía (Fotografía, M. Tarenghi, Observatorio Europeo Austral.)

Se acercó al telescopio y miró a su través la galaxia. Ahora podía reconocer ya las estrellas individuales. Le sorprendió que las estrellas más brillantes fueran todas rojizas. Esto es lo que da su color a la galaxia, pensó, y dirigió inmediatamente el telescopio hacia el rayo azul. Esperaba que el rayo estaría formado por estrellas azules, pero vio que se equivocaba. Incluso en el telescopio el rayo aparecía con una luz uniforme de color blanco azulado. Parecía estar formado por gas brillante, no por estrellas individuales.

—La galaxia mayor y más bella del cúmulo de Virgo —explicó el astronauta—. Los astrónomos la llaman M87[5], incluso desde la Tierra puede reconocerse el rayo en las fotografías astronómicas. Todavía han despertado más interés las intensas emisiones de radio que se reciben en la Tierra procedentes de esta galaxia. Aquí, en sus propiedades, la radiación es más intensa todavía. Vamos a atravesar ahora el cúmulo de Virgo y volveremos a nuestra Vía Láctea. Tenemos que recorrer todavía una distancia de 24 Mpc.

El astronauta apretó otra vez los botones de su ordenador y el señor Meyer pudo acercarse de nuevo al telescopio. Era evidente que la nave espacial se había acercado ya a nuestra galaxia. El cielo se había oscurecido de nuevo. Las galaxias del cúmulo de Virgo eran ya más débiles. Se habían apretujado en una dirección que, según supuso el señor Meyer, era de donde procedía la nave espacial.

—Ahora estamos a 10 Mpc de casa —explicó el astronauta— Nuestra galaxia aparece a simple vista en el cielo como aparecería una pequeña moneda a 6 metros de distancia.

Llevó al señor Meyer al telescopio y le mostró la nubecilla que continuaba siendo muy débil. Se oyó un susurro en la habitación.

—Esta es la señal de los radiotelescopios de a bordo que acabo de apuntar hacia nuestro sistema natal. De allí, de nuestra patria captamos radioemisiones en una amplia gama de longitudes de onda. Cubren todo el dominio de las ondas ultracortas y se extienden incluso a ambos lados, más allá de él, desde los 20 a los 300 megahercios. La «imagen de radio» que revelan los radiotelescopios muestra también claramente una estructura espiral, y los brazos espirales no sólo brillan más en luz visible sino que emiten más ondas de radio que las zonas intermedias.

---

[5] La designación indica que se trata del objeto número 87 del catálogo de objetos nebulosos del cielo que publicó en París el astrónomo lorenés Charles Messier (1730-1817).

Aparecen las estrellas de la Vía Láctea

—Ahora comprobamos que nuestra galaxia tiene dos nebulosas acompañantes, las dos Nubes de Magallanes, situadas a 52 y 63 kpc de nuestro Sistema Solar. Desde la Tierra pueden verse a simple vista en el cielo austral. —El señor Meyer pudo ver claramente con el telescopio dos nubecillas que acompañaban el cuerpo espiral. Además la forma espiral y elíptica de nuestra galaxia parecía presentar el aspecto de un disco. El señor Meyer no podía explicar exactamente por qué tenía esta impresión. Quizá porque últimamente había visto muchos sistemas así. Había visto algunos desde la nave espacial, directamente desde arriba, por así decirlo, aunque en el Universo no hay ni arriba ni abajo. Había visto otras galaxias de lado (fig. 1-4). Esto le demostró que casi todas las galaxias son cuerpos planos.

El astronauta apretó de nuevo sus botones.

—Vea ahora nuestra galaxia, desde una distancia de 1 Mpc en el telescopio —invitó al señor Meyer. Éste comprobó con mayor claridad todavía que estaba observando oblicuamente, de lado, un disco delgado y circular. Pero fuera del disco plano el espacio no parecía estar vacío. ¿O eran imaginaciones suyas? Veía a ambos lados pequeñas nebulosidades. Observando con mayor detenimiento los brazos espirales se distinguían estrellas individuales en las regiones exteriores de los brazos. El tenue resplandor, lechoso y difuso, se convertía en el telescopio en una multitud de puntos estelares. El señor Meyer comprendió entonces que la nave espacial se había acercado volando a un conjunto de muchos miles de millones de estrellas. También las nubecillas de ambos lados del disco se transformaban en el telescopio en grupos estelares. Eran cúmulos estelares de forma esférica. El señor Meyer calculó que cada uno de estos cúmulos globulares contenía miles de estrellas. También las dos Nubes de Magallanes se habían convertido ahora en aglomeraciones de incontables estrellas.

El astronauta manejó de nuevo su ordenador. El disco empezó a cubrir una parte cada vez mayor del cielo, profundamente negro. El señor Meyer observó que fuera del disco, en

la región ocupada por los cúmulos estelares globulares también había estrellas solas, aunque su densidad era muy inferior a la del disco. Muchas se caracterizaban por su color rojo, propiedad que compartían con las estrellas más brillantes de los cúmulos globulares. El señor Meyer reconoció claramente en el disco la estructura espiral.

—La densidad estelar en las zonas donde hay brazos espirales no es mucho mayor —dijo el astronauta— Pero se observa que a lo largo de cada brazo espiral hay grupos de estrellas brillantes y azules que parecen provocar un brillo difuso y nebuloso en sus proximidades. Lo que hace destacar los brazos espirales son las estrellas azules y la luz difusa.

El astronauta miró una cinta de registro que acababa de sacar de un aparato de medida y dijo:



Fig. 1-4. Las galaxias que vemos de costado demuestran que muchas de ellas tienen forma de disco delgado (Fotografía: Observatorio Palomar.)

—Nuestros radiotelescopios, además de la emisión de radio que cubre un amplio intervalo de frecuencias, señalan la presencia de una radiación centrada con bastante precisión en la longitud de onda de 21 cm.

»Nos dirigimos ahora a un lugar del disco que está alejado unos 10 kpc del centro; es la región que corresponde a nuestro Sistema Solar. El lugar del disco donde vamos a entrar y sus proximidades son bastante más oscuros que el centro y los bordes del disco. Usted mismo puede comprobarlo a simple vista. Ahora nos acercamos lentamente al disco que aparece debajo nuestro como un enorme plato y que ocupa casi medio cielo.

El astronauta tocó de nuevo los botones de su ordenador de mando. El señor Meyer miró hacia un disco enorme e inmóvil, compuesto por innumerables estrellas. Vio claramente en él una mancha oscura, el lugar del cual le había hablado antes el astronauta. ¿Pero existía realmente un «antes»? El señor Meyer había perdido ya la noción del tiempo. El telescopio apuntaba exactamente al lugar más oscuro del disco. El señor Meyer miró por el telescopio y reconoció una nubecilla de estructura espiral, otro sistema situado a gran distancia que se hacía visible a través de nuestro sistema galáctico. ¡La Vía Láctea se había hecho transparente! Miró pues hacia el espacio detrás de otras estrellas de nuestro sistema y vio muy lejos otro sistema espiral. Aquello le sonó familiar. ¿Dónde había visto antes este sistema? Ni siquiera nuestra Vía Láctea tenía espirales tan bellas cuando la había contemplado desde el exterior. Su mirada se concentró más intensamente en la espiral. La vio cada vez con mayor claridad como si fuera una fotografía sobre papel brillante. ¡Ah, *era* una fotografía! El señor Meyer estaba mirando un libro. Estaba de nuevo en la sala de estar de su casa. Tenía el vino al lado. Su sueño había finalizado.

En la Vía Láctea

Continuemos nosotros el sueño del señor Meyer. Imaginémonos que estamos en la nave espacial y que penetramos más en el disco. No nos preocupemos ahora por las posibles consecuencias de desplazarse a una velocidad increíble. El disco se ha enrarecido tanto en su parte interior que podemos calificarlo con razón de anillo brillante. El anillo que resplandece tenuemente se hace cada vez mayor hasta que divide el

cielo en dos mitades iguales. Hemos llegado al plano central del disco. Vemos estrellas individuales en todas direcciones. Estamos en medio de ellas. El disco se ha convertido en la banda de la Vía Láctea. Durante la última aproximación han dado señales de vida varios instrumentos de a bordo. Los receptores de partículas en la superficie exterior de la nave espacial señalan la presencia de átomos de gas: hidrógeno, helio e indicios de casi todo tipo de átomo. El gas está muy enrarecido, y tenemos en promedio sólo un átomo de hidrógeno por centímetro cúbico. La temperatura es de –180°C. Los detectores registran también la presencia de granos de polvo, minúsculos, con diámetros de milésimas o diezmilésimas de milímetro. Los granos de polvo son mucho más raros que los átomos gaseosos. En una esfera de cien metros de radio encontramos en promedio sólo dos de estos diminutos granitos.

Mientras tanto los detectores dan la alarma anunciando la presencia de partículas de alta energía. Cada centímetro cuadrado de la superficie exterior de nuestra nave espacial es bombardeado cada dos segundos por una partícula de alta energía. En general se trata de protones, es decir, núcleos de hidrógeno, o también núcleos de helio, las llamadas partículas alfa que llegan con una gran energía. Vuelan casi a la velocidad de la luz y tienen un potencial destructivo increíble: no hay núcleo atómico que pueda resistir el choque con una de estas partículas de gran energía. Ahora dan señales los aparatos que miden el campo magnético. Han descubierto un campo magnético débil en el espacio del disco de nuestra Vía Láctea. Su intensidad es sólo una cienmilésima parte de la intensidad del campo magnético que mueve en la Tierra la aguja de la brújula. Las líneas del campo magnético de la Vía Láctea discurren más o menos a lo largo de los brazos espirales. Habría que decir muchas más cosas sobre las indicaciones de los aparatos de a bordo. Están registrando rayos X, principalmente los que llegan de estrellas individuales, a menudo en forma de impulsos breves y regulares que se suceden uno a otro a intervalos quizá de segundos o incluso más rápidos. Los radiotelescopios miden el tic tac uniforme de los pulsares, estrellas moribundas. Pero las estrellas individuales no tienen tanta importancia en el tema que nos

ocupa. Nos interesa más el aspecto total que ofrece el disco de la Vía Láctea.

Miremos simplemente a través de la ventana o cojamos un pequeño telescopio de gran angular, por ejemplo unos prismáticos normales, y miremos el cielo. La banda de la Vía Láctea señala la región del cielo donde vemos el disco de canto y donde observamos un número especialmente grande de estrellas. La banda está dividida en varios lugares; una franja oscura en la mitad separa dos bandas parciales que discurren una al lado de la otra. La franja oscura recuerda las franjas centrales oscuras que vio el señor Meyer cuando observó de lado y desde fuera otras galaxias. En realidad es lo mismo. Cerca del plano central se han acumulado masas de gas y de polvo: el mismo gas y el mismo polvo que han captado nuestros detectores de partículas. El polvo explica las franjas oscuras. Los granitos de polvo cósmico son muy pequeños y su densidad es mínima, sin embargo en los grandes espacios del plano central de la Vía Láctea son tantos que debilitan la luz de las estrellas situadas detrás suyo y hacen pensar que no hay estrellas o por lo menos que su número ha disminuido. Con potentes telescopios pueden verse las estrellas de detrás con su luz debilitada por las masas de polvo. Esta luz es mucho más roja que la de otras estrellas, un signo inconfundible de la presencia de masas absorbentes de polvo. Conocemos ya este fenómeno en la Tierra. El Sol cuando se pone aparece enrojecido si su luz nos llega atravesando capas de aire ricas en polvo cercanas al horizonte.

En muchos lugares de la banda de la Vía Láctea observamos nebulosas brillantes, generalmente masas gaseosas que emiten luz estimuladas por estrellas brillantes. El señor Meyer había visto ya desde fuera que estas masas se sitúan a lo largo de los brazos espirales. Desde dentro esto no es tan obvio, porque desde nuestro punto de observación los brazos espirales están uno tras de otro, a menudo se tapan y es imposible observar su ordenación espacial. Hubo que esperar a los años cincuenta de nuestro siglo para poder estar seguros de que nuestro sistema galáctico tenía espirales. Se conocía en cambio la estructura espiral de otras galaxias desde mediados del siglo pasado.

El centro de la Vía Láctea

La banda de la Vía Láctea no se extiende de modo uniforme sobre el cielo. La abundancia de estrellas es mayor en la dirección del centro de nuestro disco, y es allí donde brilla con mayor intensidad la lechosa banda blanca. Pero nosotros no vemos el centro auténtico de la Vía Láctea. El polvo galáctico nos lo oculta. Se calcula que la luz visible que emite el centro nos llega debilitada un billón de veces. Es inútil pues intentar observar en luz visible el centro de la Vía Láctea.

Sin embargo, la luz de gran longitud de onda, la llamada *radiación infrarroja* (ver el cap. 2), puede atravesar fácilmente las nubes de polvo. Las ondas de radio pueden atravesar sin muchas dificultades las masas de polvo. Estudiemos pues el centro de la Vía Láctea con estos medios. ¿Qué podemos esperar? ¿Es la región central de nuestra galaxia un simple lugar de mayor densidad estelar, es decir, que sólo se distingue cuantitativamente, no cualitativamente, de las demás regiones? ¿Esperamos encontrar allí algo especial, algo exótico?

Mucho antes de que se descubriera el Polo Norte de la Tierra Jules Verne escribió su novela *Las aventuras del capitán Hatteras*, una novela de anticipación que tenía por tema el primer viaje al Polo Norte. En aquella época no se sabía todavía qué aspecto tenía este punto de la Tierra, si se distinguía de las demás regiones árticas o si aquel lugar singular con respecto a la rotación de la Tierra presentaba alguna formación determinada. ¿No debería existir algo especial en aquel punto especial de la Tierra? Jules Verne levantó en su fantasía un enorme volcán sobre el Polo Norte. Más tarde, cuando se llegó realmente a aquel lugar se descubrió que era igual de aburrido y de desanimador que las demás regiones del paisaje ártico.

¿Cómo es pues el centro de la Vía Láctea? ¿Hay allí algo exótico, alguna superestrella especial, una acumulación especial de estrellas, alguna fuente especial de radiación?

Cuando miramos desde la Tierra al cielo en la dirección del centro de la Vía Láctea miramos en la dirección de la constelación de Sagitario. Como es lógico, las estrellas brillantes a las que se ha dado en conjunto el nombre de constelación no tienen

nada que ver con el centro de nuestra Vía Láctea. Las estrellas están situadas en primer plano, algunas están de 50 a 100 pc de nosotros, mientras que el centro galáctico está situado detrás a distancias cien o doscientas veces superiores.

¿Qué revelan los radiotelescopios cuando los apuntamos hacia el centro de la Vía Láctea? Se encuentran allí varias radiofuentes, la más potente de las cuales se llama Sagitario A (fig. 1-5). Tiene un aspecto casi puntual en el cielo. Se calcula que su diámetro real es inferior a la distancia Sol-Júpiter. La energía emitida en Sagitario parece ser diez millones de veces superior a la energía total emitida por el Sol. ¿Hemos encontrado el volcán de Jules Verne en el ombligo de nuestra galaxia?

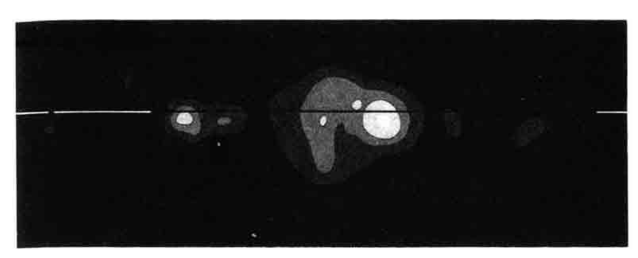


Fig. 1-5. Imagen de radio de la región central de la Vía Láctea (según mediciones de D. Downes y A. Maxwell). La intensidad de la radiación recibida está representada por distintos tonos de gris. La mancha blanca es la fuente Sagitario A en el centro galáctico. La recta horizontal corresponde al plano central de nuestra galaxia. El disco de la Luna a la escala de esta imagen tendría un diámetro de 25 mm. La banda de la Vía Láctea visible a simple vista se extiende horizontalmente a lo largo de la recta sobre la imagen, pero es tan ancha que rebasarla el borde de la imagen por arriba y por abajo.

Alrededor del centro de la Vía Láctea hay nubes dispuestas como un anillo alrededor de Sagitario A, que los radioastrónomos pueden observar gracias a que emiten ondas de radio de longitud de onda muy determinada. Esto se diferencia de Sagitario A que emite en un intervalo amplio de longitudes de onda. Pero como veremos en el siguiente capítulo, es un hecho muy afortunado que los astrónomos descubran fuentes de radiación

en el Universo que emiten de modo preferente en longitudes de onda determinadas, como lo hace una emisora de radio. La radiación emitida permite deducir datos sobre la materia emisora. Las longitudes de onda de las nubes del centro de la Vía Láctea revelan que estas nubes contienen algunas moléculas muy conocidas en la Tierra. Las nubes contienen más de 40 tipos distintos de moléculas, entre ellas la del agua y la del monóxido de carbono y formaldehído. La intensidad de la radiación que nos llega permite deducir las masas de las nubes y calcular que el anillo nebular que rodea el centro galáctico contiene cien millones de veces la masa de nuestro Sol.

¿Qué nos dice ahora la radiación infrarroja? Si se observa la región de Sagitario en una longitud de onda de 2,2 milésimas de milímetro, correspondiente a una radiación infrarroja relativamente larga, aparece en la zona donde suponemos que está el centro de la Vía Láctea una mancha clara. El centro de la Vía Láctea brilla pues con luz infrarroja. Probablemente se trata de la radiación de muchas estrellas cubiertas por nubes de polvo. Estas nubes tienen que ocultar realmente muchas estrellas y parece ser que estas estrellas están muy apretadas. Recordamos que una esfera centrada en el Sol con un radio de un año luz no contiene ninguna estrella más. Centremos en cambio una esfera así en una estrella próxima al centro galáctico, ¡y atraparemos en su interior 120.000 estrellas vecinas! Si viviéramos en un planeta en órbita alrededor de una de estas estrellas, veríamos en el cielo un millón de estrellas más, que brillarían por lo menos tanto como Sirio, la estrella más brillante de nuestro cielo nocturno. Allí nunca se haría de noche, porque las estrellas del cielo nocturno brillarían en su conjunto con una intensidad dos mil veces superior a la de nuestra Luna llena.

Parece pues que así es el centro de la Vía Láctea: una increíble acumulación de estrellas, quizá millones de soles apretados en poco espacio y entre ellos una fuente misteriosa de intensas ondas de radio. Pero hay otros tipos de radiación que atraviesan las cortinas de polvo del disco galáctico y nos informan sobre el centro del disco, aunque hasta ahora no hayamos conseguido interpretar su mensaje.

En los años sesenta se empezaron a buscar fuentes de rayos X en el firmamento. ¿Qué relación tienen con el cielo estrellado los rayos X, que la mayoría de nosotros conocemos por sus aplicaciones médicas? Los astrónomos han recurrido a todos los tipos de radiación conocidos para conseguir la mayor información posible sobre el Universo en el espacio exterior. Después de la última guerra aparecieron nuevas técnicas. Una de ellas, la técnica de las altas frecuencias, permitió utilizar para la investigación las ondas de radio de procedencia cósmica. Pero en el caso de los rayos X las técnicas con base en el suelo no sirven de nada. Los rayos X no pueden atravesar las capas inferiores de la atmósfera terrestre. Es preciso salirse de la atmósfera para poder «ver» los rayos X cósmicos. Sólo los aparatos de medición transportados en globo o proyectados con cohetes a mayor altura pueden registrar los rayos X de origen cósmico. La búsqueda de fuentes cósmicas de rayos X permitió descubrir muchas estrellas que emiten rayos X: las *estrellas de rayos X.* Pero también pudo estudiarse el centro galáctico con instrumentos de rayos X. Los rayos X atraviesan las nubes de polvo que nos impiden ver el centro de la Vía Láctea en luz visible. Como en el caso de las ondas de radio, disponemos para los rayos X de una «ventana» que nos permite echar una ojeada al exterior. Si tuviéramos ojos de rayos X podríamos ver el centro de la Vía Láctea. En lugar de ojos de rayos X utilizamos complicados aparatos receptores.

¿Qué aspecto presenta la imagen en rayos X del corazón de nuestra Vía Láctea? Aparece como una mancha borrosa y clara, del mismo tamaño aproximado que la Luna llena. Los rayos X se crean en el espacio cuando las masas gaseosas tienen una temperatura muy elevada. ¿Estamos observando con los telescopios de rayos X una bola cósmica de fuego en el centro de la Vía Láctea?

Es posible que nos llegue del centro galáctico otro tipo de radiación, la llamada *radiación gamma* (ver el cap. 2). Esta radiación existe en la Tierra como producto de la descomposición de sustancias radiactivas. Tiene mucha energía, y atraviesa nuestros cuerpos y otros materiales con mucha mayor facilidad que los rayos X. La radiación gamma puede atravesar

fácilmente las nubes galácticas de polvo, sin embargo es atrapada por la atmósfera terrestre, y por ello los rayos gamma de origen cósmico sólo pueden observarse con globos, cohetes o satélites. Estos rayos se crean en los espacios de la Vía Láctea cuando partículas de radiación cósmica moviéndose a gran velocidad chocan con otros átomos que volaban de modo más pacífico por el espacio. En los años setenta cobró cuerpo la sospecha de que estamos recibiendo de la dirección del centro galáctico un tipo especial de intensa radiación gamma (ver la pág. 70).

Por lo que hemos visto hasta ahora es evidente que el centro de la Vía Láctea nos envía todo tipo de radiación. Sin embargo, todavía no podemos hacernos ninguna idea de lo que hay realmente en aquel lugar.

En primer lugar debemos poner algo de orden en la desconcertante multiplicidad de radiaciones que hemos encontrado hasta ahora y empezar con el tipo más importante, la *radiación electromagnética*.

Esta radiación es parte integrante del mundo material. Quizá sea una injusticia decir únicamente «mundo material» cuando queremos distinguirlo del mundo espiritual (que de todos modos tiene su origen en ámbitos materiales, nuestros cerebros). He llamado mundo material al mundo formado por radiación y por materia, ignorando con ello la radiación. Esto se debe a que en nuestro Universo la radiación ocupa un lugar subordinado en relación a la materia, como ocupa por ejemplo un lugar subordinado el presupuesto de investigación de un gobierno en relación al presupuesto militar. Veremos más tarde (cap. 12) que no siempre fue así (me refiero a la radiación, no al presupuesto de investigación), que en una época anterior la radiación desempeñaba el papel predominante en el Universo. Es probable incluso que la radiación sea la madre de la materia.

II. LA LUZ

> Cuando se destruye materia el proceso consiste simplemente en la liberación de energía ondulatoria confinada, que luego escapa por el espacio. Estas concepciones reducen todo el Universo a un mundo de luz presente de modo potencial o real, así que la historia entera de su creación puede contarse de modo absolutamente preciso y completo en seis palabras: «Y Dios dijo: hágase la luz.»
>
> JAMES J. JEANS (1877-1946)

Hasta hace poco casi todos nuestros conocimientos del Universo derivaban únicamente de la luz que llega a nosotros después de atravesar el espacio vacío, la luz emitida hace milenios por las estrellas.

Ondas en el espacio vacío

Algunas cosas que nos parecen de entrada bien conocidas se vuelven más misteriosas e incomprensibles a medida que las estudiamos. Una de ellas es el concepto del espacio vacío.

No me refiero con esto a un espacio de extensión infinita y que al mismo tiempo no contiene nada. Este espacio nos resulta inquietante, porque nos parece que sólo podemos hablar del espacio si contiene objetos o está rodeado por objetos: objetos que podríamos utilizar como reglas para medir este espacio. Pienso en algo más simple que ese espacio incomprensible de extensión infinita. Me refiero más bien a un espacio vacío, pequeño y abarcable que podríamos fabricarnos nosotros mismos extrayendo por ejemplo todo el aire de una botella de cristal. Parece que un espacio así no debería depararnos ninguna sorpresa. Pero basta colgar dentro de la botella una aguja de brújula para enterarse de lo que puede hacer un espacio vacío. La aguja se orienta hacia los polos magnéticos de la Tierra. El

campo magnético de la Tierra llega hasta la aguja incluso dentro de un espacio sin aire. Puede comprobarse del mismo modo que el espacio vacío tampoco detiene la fuerza de atracción eléctrica (sabemos ya los efectos mecánicos de las cargas eléctricas: cuando nos peinamos, el peine atrae el pelo seco). Llegamos así a la conclusión de que las fuerzas eléctricas y magnéticas actúan también a través del espacio vacío. Las fuerzas gravitatorias tienen esta misma propiedad. La Tierra retiene a la Luna en su órbita a pesar de que el espacio entre ambos cuerpos está prácticamente vacío. Sin embargo el hecho nos resulta incomprensible. ¿Cómo sabe la aguja imantada en la botella vacía que fuera de ella domina el campo magnético de la Tierra? La aguja está totalmente aislada. Puede excluirse una posible acción a través de la punta que sostiene la aguja imantada y le permite girar, ya que el campo magnético de la Tierra orienta también las agujas que caen en el vacío. Estamos acostumbrados en nuestra vida diaria a que las acciones nos lleguen siempre a través de un medio. Un ejemplo son las señales sonoras que se transmiten a través del aire, del agua o de la pared. Si hacemos sonar un timbre eléctrico dentro de nuestra botella sin aire dejaremos de oírlo. Sin embargo, las acciones eléctricas y magnéticas se transmiten a través del espacio vacío. Todos hemos podido observarlo, puesto que vemos con nuestros ojos el Sol y la Luna. La luz de estos dos astros, al igual que la de otros cuerpos celestes, llega hasta nosotros. La luz se ha desplazado a lo largo de grandes distancias por el espacio vacío antes de alcanzar nuestros ojos. Pero la luz es una alternancia de fuerzas eléctricas y magnéticas creada en las lejanías del espacio sideral que actúa en nuestros ojos y desencadena sensaciones luminosas. Cuando en una noche sin Luna observamos la nebulosa de Andrómeda los bastoncillos de nuestra retina son estimulados por fuerzas eléctricas generadas en las estrellas de aquella galaxia hace dos millones de años. Estas acciones eléctricas (y magnéticas) han atravesado 670 kpc de un espacio casi vacío hasta llegar hasta nosotros, y nosotros las captamos a simple vista como luz.

¿Qué es lo que nos llega de la nebulosa de Andrómeda? ¿Qué relación tiene nuestra sensación de luz con las fuerzas

eléctricas y magnéticas? Intentaremos explicarlo recurriendo a un experimento mental.

Imaginemos que tenemos en el espacio vacío una esfera cargada eléctricamente: puede ser una esfera metálica. Con ayuda de un peine cargado al peinarnos hemos acumulado en ella una carga eléctrica. Luego hemos separado el peine, es decir, lo hemos situado a gran distancia de la esfera. Supongamos que el espacio restante está vacío, o sea, que para no perturbar nuestro experimento la materia restante queda a gran distancia. Imaginemos ahora que situamos a 300 km de distancia de la esfera un electrón, es decir, una de las partículas materiales que «revolotean» normalmente alrededor de nuestros átomos formando parte de su envoltura electrónica y que poseen una carga eléctrica negativa, como todos los electrones de la naturaleza.

Nuestros dos cuerpos, la esfera cargada negativamente y el electrón cargado negativamente, se repelen y el electrón se irá alejando lentamente de la esfera, porque capta su fuerza de repulsión a pesar de los 300 km que lo separan de ella.

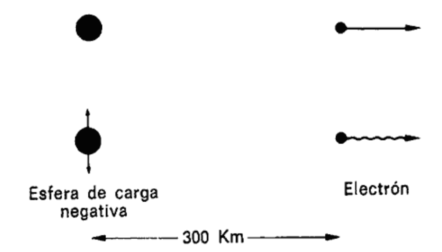


Fig. 2-1. Una esfera cargada negativamente y un electrón, que posee de modo natural una carga negativa, se repelen. El electrón se desplaza hacia la derecha (arriba) impulsado por la repulsión. Si se pone la esfera en oscilación, el movimiento del electrón también se pondrá a oscilar. Se desplazará entonces siguiendo una «línea ondulada» hacia la derecha (debajo). La oscilación de la esfera se ha transmitido al electrón.

Demos ahora a la esfera un movimiento oscilatorio, como el mostrado en la figura 2-1. El electrón también empezará a oscilar mientras se aleja de la esfera. El movimiento oscilatorio de la esfera se ha transmitido a través del espacio vacío hasta

el electrón situado a 300 km de distancia. Si situamos con una orientación adecuada una aguja imantada en el lugar ocupado por el electrón, también ella empezará a oscilar. Deducimos pues que de la esfera cargada en movimiento no sólo parten efectos eléctricos hacia el espacio sino también efectos magnéticos, a pesar de que la esfera cuando estaba inmóvil carecía totalmente de magnetismo.

Si lleváramos a cabo un experimento más preciso haciendo oscilar la esfera antes inmóvil comprobaríamos además que el electrón y la aguja imantada entran en oscilación al cabo de una milésima de segundo. Las acciones eléctricas y magnéticas no se propagan con una rapidez infinita. Si pudiéramos efectuar la medición con mayor exactitud descubriríamos que la acción de la esfera sobre el electrón y sobre la aguja imantada se transmite por el espacio exactamente con la misma velocidad que la luz. Nuestra esfera oscilante genera de hecho algo parecido a la luz. Cada segundo su efecto se propaga por el espacio hasta 300.000 km. En consecuencia, nuestro electrón y nuestra aguja imantada empiezan a oscilar una milésima de segundo después que la esfera situada a 300 km. La acción que parte de la esfera recibe el nombre de *ondas electromagnéticas*.

Todo esto nos recuerda otros procesos conocidos de la vida cotidiana.

Imaginemos la superficie de un lago tranquilo que no ondula ninguna brisa. Estamos sentados en el embarcadero con un pie colgando encima mismo del agua. Tenemos un corcho flotando a una cierta distancia. Pisemos ahora rítmicamente el agua. Generamos con este movimiento ondas en la superficie del agua que se difunden con una velocidad determinada. Al cabo de un tiempo las ondas llegan hasta el corcho y éste empieza a subir y bajar. Nuestro pie, que genera las ondas, corresponde a la esfera del experimento, el corcho desempeña el papel del electrón. Podemos decir análogamente que la esfera oscilante emite ondas que se propagan con la velocidad de la luz. Pero *¿qué* oscila realmente en una onda electromagnética? ¿Qué desempeña el papel del agua, cuando la onda se difunde

por el espacio vacío? Vemos ahora que el espacio que irreflexivamente llamábamos espacio vacío solamente porque lo consideramos vacío de toda materia es algo muy complicado.

Volvamos al ejemplo de las ondas sobre la superficie del agua. Al pisar rítmicamente el agua con mayor o menor rapidez el corcho oscilará de modo más rápido o más lento. El número de movimientos hacia abajo de nuestro pie por segundo se denomina *frecuencia.* Podemos comprobar fácilmente que el corcho oscila con la misma frecuencia con que se mueve el pie. La distancia entre dos cúspides de la onda que se expande por el agua se llama *longitud de onda.* Cuanto mayor sea la frecuencia más corta será la longitud de onda. El experimento en el lago permite comprobarlo.

Vamos a introducir primero una medida de la frecuencia para captar mejor esta relación. Imaginemos un pequeño peso colgando de un bramante de 25 cm de longitud. Si damos un golpe al peso, éste empezará a oscilar como un péndulo. Dará una oscilación cada segundo. Los físicos dicen que el péndulo oscila con una frecuencia de un *hercio* (hz). El nombre recuerda a Heinrich Hertz (1857-1894), el físico alemán descubridor de las ondas eléctricas que son el tema de este capítulo. Nuestro péndulo tiene una frecuencia muy baja. Un abejorro hace oscilar sus alas arriba y abajo cuarenta veces por segundo. Esto corresponde a una frecuencia de 40 hercios. Las ondas eléctricas tienen frecuencias más elevadas; pueden oscilar de modo tal que las cargas eléctricas se muevan mil veces por segundo. Se dice entonces que la frecuencia es de un *kilohercio* kHz). Si oscilan un millón de veces tenemos un *megahercio* (MHz). En radioastronomía se dan a menudo frecuencias en *gigahercios* (gHz). Un gHz corresponde a 1.000 MHz. Como se explica en el apéndice A, puede determinarse de modo sencillo la longitud de onda de las ondas eléctricas a partir de su frecuencia. Si la frecuencia se da en megahercios y la longitud de onda en metros, se tiene

$$\text{frecuencia} \times \text{longitud de onda} = 300.$$

Una onda eléctrica de 10 MHz tiene una longitud de onda de 30 m (puesto que 10 × 30 = 300). A una frecuencia de 1 kHz

(= 0.001 MHz) corresponde una longitud de onda de 300.000 m (puesto que 0,001 × 300.000 = 300).

Las ondas de la sección siguiente no son generadas por una esfera oscilante cargada, sino por la antena de una emisora de radio. El emisor mueve cargas arriba y abajo por el hilo de la antena, del mismo modo que en nuestro experimento mental movimos la esfera cargada hacia delante y hacia atrás. Veremos que las ondas electromagnéticas producidas de este modo adoptan las formas más distintas.

Radiaciones que en la vida diaria no imaginamos que tengan ningún tipo de relación, como las ondas de radio y la luz solar, resultan ser casi lo mismo: ondas electromagnéticas que sólo se diferencian por su frecuencia (o lo que es lo mismo, por su longitud de onda).

El señor Meyer sueña con el espectro electromagnético

Una tarde el señor Meyer estaba sentado ante su receptor de radio. Se estaba transmitiendo un concierto público, era ya tarde y sus ojos se cerraron.

De pronto se encontró entre el público de la sala de conciertos de la emisora. Oyó los aplausos de los demás y se dio cuenta de que el concierto había llegado a su final. El público se levantaba y se dirigía apresuradamente al guardarropas. El señor Meyer se entretuvo paseando por la sala de descanso. Vio entonces una puerta en la que hasta entonces no se había fijado. La curiosidad se apoderó inesperadamente de él e intentó mover el pomo de la puerta. Vio con sorpresa que no estaba cerrado. Entró en un pasillo largo e iluminado. Cerró rápidamente la puerta detrás y empezó a recorrer indecisamente el pasillo. En realidad debería haber vuelto hacia atrás para recoger su abrigo.

—Hola —murmuró alguien de repente. El señor Meyer dio media vuelta y vio a un señor bajo y mayor con gafas metálicas y bigote.

—Hola —contestó el señor Meyer— ¿Quién es usted?

—Soy el técnico de la radio —dijo el hombrecito—. Tengo a mi cargo la emisora. ¿Ha visto usted alguna vez una emisora de radio? ¿No? Entonces venga conmigo.

El ingeniero condujo al señor Meyer por una puerta lateral a una sala llena de instrumentos con diales y válvulas de radio que tenían sus filamentos al rojo. Se detuvo ante una mesa con una gran palanca.

—Desde aquí controlo la emisora —dijo el hombrecillo—. Aquí, con esta palanca, se fija la longitud de onda; pero nadie debe tocarla, porque nuestra emisora tiene que emitir con una longitud de onda exacta de 375 m, para que puedan oírnos todos los que tienen sintonizada esta longitud de onda. Puede ver ahí fuera la gran antena desde la cual nuestras ondas de radio se emiten al mundo.

El ingeniero de radio apagó la luz de la habitación. Sólo brillaban débilmente las válvulas de radio. El señor Meyer vio a través de la ventana dos grandes mástiles que se levantaban ante el oscuro cielo nocturno, y por ser noche de Luna llena vio también el cable de la antena tendido entre los dos mástiles.

—Sin embargo hoy, ya que usted está aquí, voy a saltarme todas las reglas. Quiero enseñarle lo que pueden hacer mis aparatos. Voy a pasar ahora a longitudes de onda más cortas. —Mientras hablaba acercó un poco la palanca hacia sí— Ahora estamos a 50 m. Mi emisora genera ahora ondas cortas.

Continuó moviendo la palanca.

—Voy a pasar rápidamente por la banda de los 11 m, de lo contrario, interferiremos las emisoras de la CB —dijo sonriendo— Ahora llegamos al dominio de las ondas centimétricas y milimétricas.

La palanca se había desplazado ya bastante desde su posición inicial. Dios mío, pensó el señor Meyer, ¿cómo va a encontrar luego su longitud de onda inicial? Pero el hombrecillo continuó moviendo la palanca.

—Ahora nuestra longitud de onda es de unas milésimas de milímetro. Saque por favor la mano por la ventana. —El señor Meyer abrió la ventana, hizo lo que le pedían y notó algo. Desde la antena le llegaba calor a la mano. Parecía casi como

si hubiera tendido la mano a la luz del Sol. Pero fuera continuaba siendo de noche.

—Voy a disminuir la longitud de onda —anunció el hombrecillo. El señor Meyer miró involuntariamente hacia arriba y vio que el cable de la antena estaba brillando con color rojo oscuro—. Mi emisora empieza ahora a producir luz. Antes era luz infrarroja, es decir radiación térmica, ahora tenemos luz roja, de onda larga. Sigo.

El cable tomó un color amarillo, luego verde.

—Estoy reduciendo continuamente la longitud de onda. —El cable se volvió azul y violeta— Ahora tengo una longitud de onda de cuatro diezmilésimas de milímetro. Antes de continuar, debería usted protegerse los ojos. Llegamos ahora al dominio ultravioleta.

Mientras decía esto alargó al señor Meyer unas gafas oscuras. Pero el señor Meyer ya no vio brillar más la antena. Sólo su camisa blanca resplandecía en la oscuridad con un tono azul.

—Antes de continuar, deberíamos protegemos mejor. Ahora estamos en la cienmilésima de milímetro. Mi antena empieza a emitir rayos X.

El técnico trajo dos delantales gruesos y pesados de plomo, como se ponía siempre el médico del señor Meyer cuando lo examinaba por la pantalla.

—No puede verse nada —dijo el ingeniero—, pasemos pues inmediatamente a los rayos gamma. Su longitud de onda es mil veces más corta que la de los rayos X.

El señor Meyer miró a la antena, pero el cable continuaba oscuro.

—Nuestros ojos son tan incapaces de ver los rayos gamma como de ver los rayos X. Pero ahora emitimos tanta energía que nuestra emisora ya no puede resistirlo. —De hecho en la habitación olía ya a cable quemado y de una caja en la pared salían bocanadas de humo. La palanca estaba tirada hacia delante el máximo posible y el ingeniero quiso volverla a su lugar. Algo se había atascado, y el humo se hizo más intenso.

—¡Ayúdeme, por favor! —gritó el hombrecillo, pero las fuerzas del señor Meyer también fueron insuficientes y la pa-

lanca quedó inmóvil en su posición extrema. Empezaron a saltar chispas de algún lugar. El hombrecillo estaba desesperado. Parecía inminente una catástrofe. El señor Meyer se despertó.

Estaba sentado en su butaca, y era ya bastante más tarde de medianoche. La radio estaba encendida y sintonizada en los 375 m de longitud de onda. Pero no se oía nada. Todavía no han resuelto el problema, pensó el señor Meyer.

El espectro

El sueño del señor Meyer nos ha demostrado que las ondas de radio, la radiación térmica, la luz de distintos colores, los rayos ultravioleta, los rayos X y los rayos gamma de gran energía son lo mismo, a saber, radiación electromagnética, y que sólo se distinguen entre sí por su longitud de onda.

De todos modos, una emisora capaz de emitir ondas tan cortas como la radiación térmica o la luz sólo puede existir en un sueño. En realidad las ondas electromagnéticas de distintas longitudes de onda se generan mediante mecanismos distintos. Pero sea cual fuere este mecanismo siempre tienen un papel importante las cargas eléctricas en movimiento, como la esfera oscilante cargada eléctricamente de nuestro experimento mental.

La emisora del sueño del señor Meyer emitía en cada momento en una frecuencia fija. Al principio estaba sintonizada en la longitud de onda de 375 m y por lo tanto sólo emitía en esta longitud de onda. La correspondiente frecuencia es de 801 kHz, o sea 0,801 MHz. Si dibujamos en un diagrama la potencia emitida en distintas frecuencias, obtenemos un dibujo como el de la figura 2-2. La emisora sólo emite radiación en «su» frecuencia de 801 kHz. Se llama *espectro* la representación de la intensidad con que emite una fuente de radiación en distintas frecuencias. Todos nosotros hemos investigado alguna vez un espectro. Cuando giro el botón de sintonía de mi receptor de radio, recorro con el receptor una determinada banda de frecuencias. Al llegar a la frecuencia (o longitud de onda) de una emisora, el aparato capta mucha más energía. Si me aparto de

esta emisora capto relativamente menos energía. Algunos receptores tienen un indicador que permite leer la intensidad de la radiación recibida. La figura 2-3 se ha realizado con un aparato de este tipo. El diagrama indica la intensidad de las ondas de radio captadas en el norte de Munich pertenecientes al dominio de las ondas ultracortas, o sea la modulación de frecuencia. La curva señala la intensidad de la radiación captada en las distintas frecuencias.

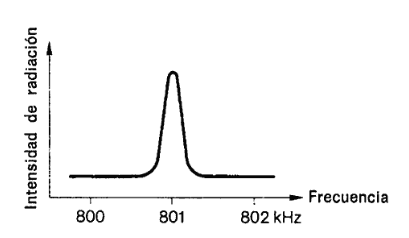


Fig. 2-2. Intensidad de emisión de una emisora de radio en distintas frecuencias. La "S potencia máxima emitida está situada en una frecuencia determinada, aquí de 801 kHz (o bien expresada en longitudes de onda, de 375 metros).

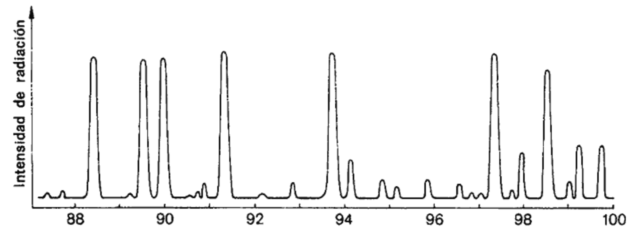


Fig. 2-3. El espectro de radio al norte de Munich. Varias emisoras de frecuencia modulada emiten con distinta intensidad en sus respectivas frecuencias. Los números en la línea inferior dan la frecuencia en MHz. La frecuencia crece en la figura hacia la derecha. A grandes frecuencias corresponden longitudes de onda pequeñas; por lo tanto, a la derecha las longitudes de onda son más cortas que a la izquierda.

En el dominio de la luz visible los espectros se obtienen con aparatos que distribuyen la luz incidente según las distintas longitudes de onda, desde la luz roja de gran longitud de onda hasta la luz violeta de corta longitud de onda; todos los colores aparecen uno al lado de otro como en el arco iris, pero más

finos. Esta banda de colores del arco iris se fotografía. Un extremo de la placa fotográfica se ennegrece con la luz roja, a continuación con la amarilla, con la verde, y finalmente al otro extremo de la tira con la luz azul y la violeta. A lo largo de la tira puede anotarse la longitud de onda o la frecuencia correspondiente. La figura 2-4 muestra el espectro de una estrella. El extremo izquierdo pertenece a la luz violeta, el derecho a la roja. Es decir, la longitud de onda aumenta hacia la derecha y la frecuencia hacia la izquierda. La estructura bastante complicada de este espectro demuestra que las estrellas emiten con intensidades distintas en longitudes de onda distintas, incluso puede distinguirse bien la intensidad de emisión correspondiente a longitudes de onda vecinas, de lo contrario no se verían las líneas oscuras y verticales, de las cuales hablaremos más tarde. Una nebulosa gaseosa, por ejemplo la nebulosa de Orión que puede verse en el cielo nocturno a simple vista debajo de las tres famosas estrellas del cinturón de Orión, emite un espectro muy distinto (fig. 2-5). Se parece más bien al espectro de las emisoras de radio representado en la figura 2-3. La nebulosa no nos envía ninguna luz en una amplia banda de longitudes de onda, y su radiación se concentra en unas pocas longitudes de onda. Se tiene así un *espectro de líneas*, porque aparecen líneas claras en los correspondientes lugares del espectro fotografiado. Las líneas claras se llaman *líneas de emisión*. También las emisoras de radio de la figura 2-3 dan un espectro con líneas de emisión.

Las masas de gas caliente no sólo brillan sino que emiten también en la banda de radio. La radiación no llega en frecuencias determinadas sino de modo uniforme a lo largo de una amplia gama de frecuencias. Por ello la radiación incidente se llama *continua*. Sucede lo mismo en el dominio óptico. Todas las estrellas emiten un espectro continuo, como hace por ejemplo un trozo de hierro calentado al rojo o al blanco. En el espectro continuo de la estrella representado en la figura 2-4 vemos líneas oscuras.



Fig. 2-4. Espectro de una estrella en luz visible tomado con un espectrógrafo. Arriba (fotografía: W. Seitter) hay una tira brillante desde el extremo violeta (izquierda) al rojo (derecha). La fotografía muestra en varias longitudes de onda rayas oscuras verticales, las llamadas líneas de absorción. La curva de debajo indica la intensidad de la luz de la estrella en las distintas longitudes de onda del espectro representado arriba.

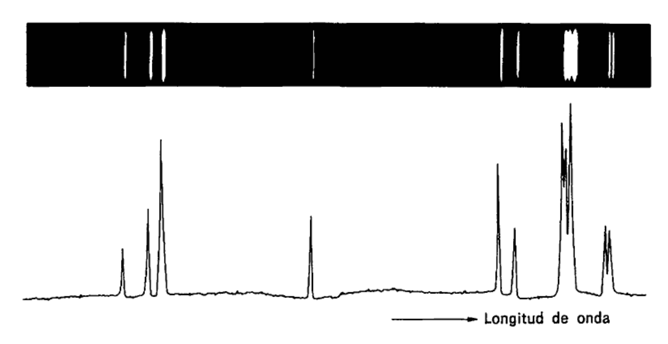


Fig. 2-5. Arriba está representado el espectro visible de una nebulosa gaseosa (fotografía: W. Seitter); abajo, la curva de registro. La nebulosa emite luz solamente en longitudes de onda determinadas. Por ello en la fotografía se ven varias líneas de emisión. La curva de registro recuerda el espectro de las emisoras de radio de la figura 2-3.

Hay pues determinadas bandas estrechas de frecuencia, en las que la estrella emite poco. Estas líneas oscuras se llaman *líneas de absorción*. La luz es absorbida durante su camino hacia nosotros en las frecuencias correspondientes a estas líneas,

y es emitida de nuevo hacia otras direcciones de modo que no nos alcanza.

Origen de las líneas espectrales

Imaginemos una fuente luminosa que emite un espectro continuo. La luz en su camino hacia el observador B podría atravesar una nube fría de gas (fig. 2-6). Los átomos de la nube tienen como todos los átomos la propiedad de absorber radiación en longitudes de onda muy determinadas, para emitirla al cabo de un tiempo en todas direcciones y de modo uniforme. Parte de la energía reemitida alcanza también el observador B, pero es muy inferior a la radiación original que se dirigía hacia él. El observador ve pues zonas oscuras en el espectro continuo de la fuente, situadas en las frecuencias en las que los átomos de la nube de gas han absorbido luz. El espectro presenta en estas zonas líneas de absorción oscuras. Cualquier gas, tanto si es hidrógeno como helio o vapor de hierro, imprime en el espectro estelar una especie de huella digital formada por un conjunto de líneas de absorción, que es característico de la materia del gas.

El espectro de la luz solar presenta numerosas líneas de absorción, como observó ya en 1804 el físico inglés William Wollaston. Joseph von Fraunhofer (1787-1826), hijo de un maestro vidriero de la baja Baviera, las estudió luego con mayor detenimiento. Fraunhofer empezó como aprendiz de fabricante de espejos y cortador de cristales y acabó siendo uno de los mayores ópticos de su época. Las líneas de absorción más intensas del espectro solar y de los espectros de las estrellas se llaman todavía hoy *líneas de Fraunhofer*.

Quizá sorprenda enterarse de que el espectro solar presenta líneas de absorción. ¿No habíamos visto que estas líneas se crean cuando la luz de una fuente de radiación atraviesa una nube de gas? ¿Dónde vemos una nube en el recorrido de la luz entre el Sol y la Tierra? La explicación es que el Sol posee como las demás estrellas una atmósfera, más fría que las capas inferiores. Esta atmósfera desempeña el papel de nube. La luz

solar debe atravesar primero esta atmósfera antes de dirigirse hacia nosotros. Los átomos de la atmósfera solar filtran entonces de la luz continua sus «frecuencias preferidas», y aparecen en el espectro las líneas de Fraunhofer.

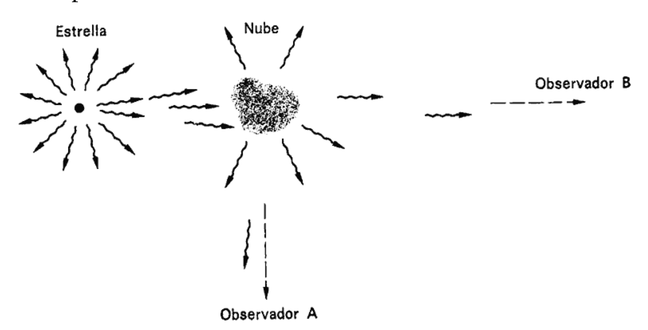


Fig. 2-6. La luz de una estrella se encuentra con una nube en su trayecto hacia un observador B. Los átomos de la nube absorben luz en longitudes de onda determinadas y la reemiten luego en todas direcciones. Esta luz no llega al observador B, quien observa ahora líneas oscuras en los puntos del espectro correspondientes a estas longitudes de onda. En cambio el observador A sólo ve las longitudes de onda en las que el observador B no ve nada (compárese también con la fig. 2-7).

Pero volvamos a la imagen sencilla de la nube absorbente (fig. 2-6). ¿Dónde se queda la radiación filtrada y extraída mientras la luz volaba hacia el observador? La nube la remite en todas direcciones. Un observador A que no ve la nube delante de la estrella y que por lo tanto no percibe la luz continua de la estrella cuando mira hacia la nube sólo ve la luz en las frecuencias en las que los átomos de la nube han absorbido antes la luz (fig. 2-7). Ve en el espectro líneas claras, como en el espectro de la nebulosa de la figura 2-4, es decir, líneas de emisión.

Cada átomo puede generar un conjunto característico de líneas en el espectro, tanto si son líneas claras de emisión como líneas oscuras de absorción, por lo tanto las longitudes de onda permiten reconocer la materia responsable. La intensidad de

cada línea permite también determinar la proporción de los distintos elementos A distancias de miles de parsecs pueden determinarse los materiales causantes de las líneas de absorción y de emisión de los espectros estelares, como si se realizara un análisis químico pero sin disponer de muestras de estos materiales en las probetas.

El hidrógeno como emisor de radio

Los átomos son objetos complicados, incluso el átomo de hidrógeno, tan simple en apariencia. En él un solo electrón gira alrededor de un núcleo compuesto únicamente por un protón. El electrón tiene sus frecuencias preferidas. Si le llega luz el electrón absorbe radiación de una determinada frecuencia y salta a una órbita situada más lejos del núcleo. Si se deja el átomo a su aire, al cabo de un tiempo determinado el electrón da un salto hacia dentro, hacia su órbita original interior, y emite luz de la misma frecuencia que antes había absorbido. La absorción y emisión de luz de frecuencias o longitudes de onda determinadas crea las líneas de absorción y de emisión de los espectros. Las líneas del hidrógeno más importantes correspondientes al hidrógeno están situadas en el dominio visible y en el ultravioleta. También pueden observarse líneas del hidrógeno en las frecuencias de radio. Todas se deben a los electrones que saltan de una órbita a otra.

Sin embargo, existe también en los átomos de hidrógeno otro proceso de emisión que no tiene nada que ver con los saltos de los electrones de una órbita a otra. Cuando el electrón de un átomo de hidrógeno recibe un ligero golpe, por ejemplo porque pasa una partícula cerca de él, puede tomar energía de este vecino pasajero sin cambiar por ello de órbita. Esto se debe a que los electrones y los protones tienen una propiedad cuya descripción más sencilla consiste en decir que las partículas giran alrededor de su eje. En el caso del átomo de hidrógeno son posibles exactamente dos casos.

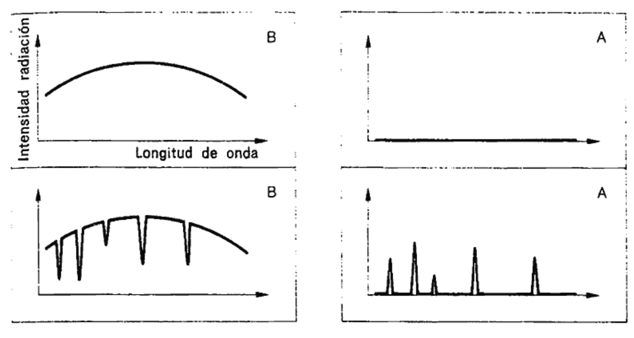


Fig. 2-7. Espectros que captan los observadores B y A (compárese con la fig. 2-6). La estrella emite un espectro continuo, que el observador B podría captar sin cambios si no hubiera una nube interpuesta (arriba a la izquierda). En cambio ve el espectro continuo atravesado por líneas de absorción (abajo a la izquierda). Cuando el observador A no dirige su telescopio a la fuente radiante, no captará ninguna luz si no hay ninguna nube (arriba a la derecha). Pero si hay una nube en su visual (como en la fig. 2-6) que absorbe luz de la estrella en determinadas longitudes de onda para reemitirla luego en todas direcciones, el observador A captará radiación en estas frecuencias concretas. Tendrá un espectro de líneas de emisión (abajo a la derecha).

O bien el protón y el electrón giran en el mismo sentido (es decir, los dos a izquierdas o los dos a derechas) o bien en sentidos opuestos (por ejemplo el protón a derechas y el electrón a izquierdas). El caso de sentidos desiguales puede convertirse en caso de sentidos iguales si el electrón experimenta un «vuelco» en su órbita (fig. 2-8). De todos modos, para que la dirección desigual de giro se convierta en la dirección igual se precisa energía. El electrón la recibe o bien mediante un choque con un átomo vecino o mediante la luz que le llega de fuera. Entonces el átomo da un vuelco sin abandonar su órbita. Al cabo de un rato sufre otro vuelco y emite la energía que tomó del vecino, desaparecido ya hace rato, o de la luz. Esta radiación ocupa una longitud de onda muy determinada: los 21 cm. Es desde luego una longitud mucho más corta que la de nuestras ondas corrientes de radio; sin embargo, puede captarse con radiotelescopios.

En cualquier lugar de la Vía Láctea donde haya una nube de hidrógeno sus átomos chocarán continuamente entre sí y los electrones bascularán y volverán a sus antiguas posiciones. Cada segundo hay miles de millones de átomos que en aquel momento vuelven a su sentido de giro anterior. La nube de hidrógeno emite una línea de emisión en los 21 cm de longitud de onda, es decir, en una frecuencia de 1.428 MHz. Las masas gaseosas de la Vía Láctea presentan estas líneas de emisión. El hidrógeno del gas que se mueve entre las estrellas de la Vía Láctea «brilla» en la longitud de onda de 21 cm. Pero cuando se observa una radiofuente con un espectro continuo, el hidrógeno interestelar imprime en la radiación de esta fuente durante su camino hacia nosotros una línea de absorción en los 21 cm. Si la radiación de la fuente situada detrás de la nube de hidrógeno pasa por los electrones de los átomos del hidrógeno, éstos absorben exactamente la radiación cuya energía precisan para dar el vuelco. Pero ésta es precisamente la radiación que luego reemiten al volver el eje a su dirección anterior. Por lo tanto, el gas de hidrógeno puede generar en los 21 cm de longitud de onda una línea de emisión o de absorción. Lo único necesario es que la nube no esté tan caliente que todos los átomos de hidrógeno se hayan ya disociado. Es decir, el electrón ha de estar unido todavía al núcleo de hidrógeno. Los electrones que no están unidos a un protón y los protones que han perdido su electrón no saben nada de la radiación de 21 cm.

La línea de los 21 cm del hidrógeno nos ha revelado muchas cosas sobre los movimientos de la Vía Láctea. Pero no sólo los átomos sino también las moléculas tienen líneas en el dominio visible y de radio que pueden manifestarse en la emisión y en la absorción. Hay en la Vía Láctea nubes que emiten en el dominio de radio las líneas de emisión de determinadas moléculas. Sabemos de este modo que en tales nubes, que son muy poco visibles, hay además de moléculas de agua moléculas de alcohol y de ácido fórmico que emiten la radiación correspondiente. Las líneas espectrales, tanto en el dominio óptico como en el de radio, no sólo nos revelan algo sobre la naturaleza química de la materia donde se originan, sino que nos informan

sobre el estado de movimiento de la materia. Trataremos de ellos en el capítulo 3.

Vimos en nuestro experimento mental al principio de este capítulo que se crea radiación electromagnética cuando un cuerpo cargado se mueve de modo no uniforme, como cuando hicimos oscilar nuestra esfera. De hecho los electrones responsables de la emisión de luz y de ondas de radio se mueven siempre de modo no uniforme. Lo propio es válido para la radiación más frecuente del Universo, la *radiación térmica.*

La radiación térmica

Imaginemos una nube de gas caliente, donde el movimiento térmico de sus átomos sea tan intenso que los choques mutuos de los átomos hayan destruido hace tiempo de modo total o parcial sus envolturas electrónicas. Tenemos pues ante nosotros una mezcla de partículas cargadas positivamente, a saber átomos, a los que faltan varios o todos los electrones, y de electrones cargados negativamente. Si nuestra nube tiene una temperatura de unos 10.000°C, la temperatura de las masas interestelares de gas en las proximidades de estrellas calientes, sus electrones se moverán con una velocidad media de 675 km/s a través del espacio. En su vuelo sufren continuamente choques con otros electrones, y principalmente con núcleos atómicos o restos atómicos positivos, que los desvían de sus trayectorias rectas o les obligan incluso a retroceder. Por lo tanto, los electrones se mueven necesariamente de modo no uniforme. Esto significa que emiten radiación electromagnética. El movimiento de nuestros electrones es muy irregular, y en consecuencia emitirán con las longitudes de onda más variadas. Si tenemos una nube con muchos electrones que contribuyen simultáneamente a la radiación, en cada momento se generará radiación en todas las longitudes de onda. Se observará pues un espectro continuo.

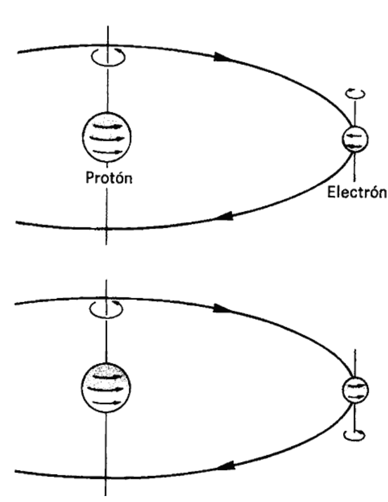


Fig. 2-8. Las dos direcciones posibles de giro del protón y del electrón en el átomo de hidrógeno. Arriba: sentido de giro opuesto: debajo: sentido de giro igual. El sentido inferior de giro se obtiene del superior cuando el electrón da un «vuelco». Para ello se necesita energía, que se libera en forma de ondas de radio de 21 cm de longitud al dar otro «vuelco» el electrón para volver a su sentido original de giro.

Si nuestra nube tiene un espesor suficiente de modo que ninguna radiación pueda atravesarla del todo sin ser perturbada, su espectro será relativamente sencillo. La nube emitirá como cualquier cuerpo caliente. La intensidad de radiación tiene en una longitud de onda determinada un máximo a partir del cual esta intensidad disminuye al pasar a longitudes de onda inferiores o superiores. La figura 2-9 reproduce los espectros de dos cuerpos de temperatura distinta. Puede observarse que cuanto mayor es la temperatura más radiación se emite. Max Planck (1858-1947) descubrió la regularidad reproducida en la figura 2-9. Se llama *ley de la radiación de Planck* y no solamente es válida para la radiación emitida por nubes gaseosas. También un trozo de hierro que se pone al rojo a los 800 grados emite según dicha ley. A esta temperatura el hierro emite una gran cantidad de luz roja. Si se calienta más no sólo emite con mayor luminosidad sino que cambia de color, pasando al amarillo y finalmente al blanco. Esto se debe a que ahora emite más en frecuencias más altas, en los dominios espectrales del verde y del azul, una mezcla cromática que nos parece blanca. Todos los cuerpos de temperatura superior a –273°C emiten radiación electromagnética según la ley de la radiación de Planck. Cuando un cuerpo tiene una temperatura de –273°C ya no

puede estar más frío y deja de emitir. Los físicos sitúan en los –273°C el cero absoluto de una nueva escala de temperaturas llamada *escala Kelvin* en memoria de lord Kelvin (1824-1907), el gran físico inglés, o también con frecuencia *escala absoluta de temperaturas.* Por lo tanto –273°C equivalen a 0 Kelvin, abreviado 0°K. Cuando las temperaturas son de miles de grados es bastante indiferente utilizar la escala centígrada o de Kelvin. Una diferencia de 273 apenas cuenta en tal caso.

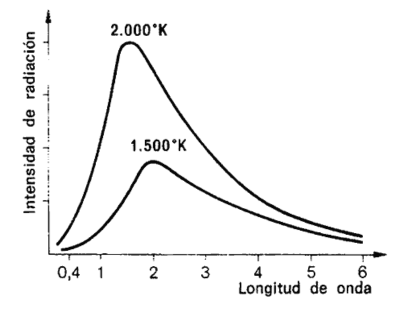


Fig. 2-9. Espectros de cuerpos emisores a distintas temperaturas. Cuanto mayor es la temperatura más intensa es la radiación y por lo tanto más alta será la curva en el dibujo. Las longitudes de onda van hacia la derecha en milésimas de milímetro. Cuanto más caliente está un cuerpo, más hacia la izquierda estará situado el máximo de radiación, en las longitudes de onda cortas. La radiación de las dos curvas, que corresponden a cuerpos de 2.000 y 1.500°K, está situada principalmente en la región del infrarrojo. Los cuerpos de 10.000°K emiten con especial intensidad en luz visible. Los cuerpos de millones de grados emiten en la región de los rayos X. Los cuerpos emiten de modo semejante a bajas temperaturas. La curva de radiación electromagnética de una persona serla mucho más baja en el diagrama. El máximo ocuparla una longitud de onda de una centésima de milímetro, es decir, el valor 10 de la derecha del dibujo. Veremos en el capítulo 12 que nos llega del Universo radiación correspondiente a la radiación térmica de un cuerpo a –270°C. El máximo de esta radiación está situado en 1 milímetro (ver la fig. 12-1).

Si calentamos ligeramente un cuerpo que está a 0°K y lo llevamos por ejemplo a –270°C o 3°K emitirá radiación, aunque nosotros no podamos captarla a simple vista. Su máximo

de emisión está situado en una longitud de onda de un milímetro. Es una longitud de onda demasiado larga para nuestros ojos y demasiado corta para un receptor normal de radio. En el capítulo 12 veremos cómo se descubrió esta radiación en el Universo.

Espectros de las profundidades del espacio

Pero dejemos el frío y volvamos a las temperaturas en las que la radiación se hace visible. El máximo de radiación está situado en el dominio visible cuando las temperaturas son superiores a los 1.000°K. Las superficies de las estrellas tienen estas temperaturas. No es ninguna casualidad. Nuestros ojos a lo largo de la evolución se han ido adaptando para ver bien en el dominio en que el Sol radia intensamente. Las estrellas emiten principalmente radiación térmica, y por lo tanto también para ellas es válida la ley del metal caliente: color rojo a temperaturas más bajas y blanco azulado a temperaturas más altas.

Observemos ahora el espectro de una galaxia lejana. No podemos apuntar nuestro telescopio a una de sus estrellas componentes sino que debemos captar simultáneamente la luz de miles de millones de estrellas, por lo tanto obtenemos un espectro al que han contribuido miles de millones de estrellas individuales, estrellas cuya temperatura superficial va de 4.000°K a varias decenas de miles de °K. En un coro no deberíamos oír las voces de los cantores individuales, sino únicamente el conjunto de todas las voces; del mismo modo en el espectro de una galaxia sólo vemos el conjunto de los espectros de muchas estrellas. Continuemos con la comparación. Imaginemos un coro de cantores cuyas voces pueden fallar todas en una nota determinada. Cuando el canto (unísono) llega exactamente a esta nota el coro entero se calla. Si todas las estrellas de una galaxia lejana tienen átomos de hidrógeno en sus atmósferas, el espectro de cada estrella mostrará las líneas de absorción del hidrógeno, es decir, que en determinadas longitudes de onda características del hidrógeno llegará menos luz de las estrellas. También llegará menos luz del conjunto de la galaxia

en estas longitudes de onda, es decir, que en el coro de los espectros de las estrellas individuales, en el espectro de toda la galaxia, aparecerán las líneas de absorción del hidrógeno. Esto no sólo es válido para el hidrógeno, sino para todo tipo de átomo, y en consecuencia nos permite saber también algo sobre la composición química de la materia en otras galaxias.

A mi parecer lo sorprendente del resultado es que no sea sorprendente. Hemos descubierto concretamente que la materia en las regiones más alejadas del Universo no es distinta de la materia que tenemos a nuestro alrededor. No solamente hay los mismos tipos de átomo, sino que aparecen también mezclándose en las mismas proporciones que por ejemplo en nuestro Sol. La materia en el borde del Universo, donde apenas alcanzan nuestros telescopios, no es una materia especial, sino materia perfectamente corriente y casera, como la que nos rodea.

Un kilogramo de materia solar contiene aproximadamente 700 g de hidrógeno y 270 g de helio. Los 30 g restantes se reparten entre los demás elementos, siendo los más frecuentes el carbono y el oxígeno. Esta parece ser, *grosso modo,* la proporción normal en las galaxias más lejanas. ¿Cómo puede explicarse este hecho?

¿Aparecieron los elementos químicos en proporciones únicas cuando se creó el Universo, o bien se han ido formando según las mismas reglas y leyes en el transcurso de la historia cósmica en galaxias separadas unas de otras? Sabemos actualmente que en las estrellas se transmutan átomos, sobre todo durante las explosiones estelares, y desde hace tiempo los astrofísicos se preguntan si los distintos elementos químicos nacieron a partir de otros más simples cuando se creó el Universo o si nacieron más tarde. Hoy en día conocemos la respuesta. Volveremos al tema más tarde, en el capítulo 12.

Una millonésima de gramo de luz

La luz no es siempre algo tan inofensivo y benigno como imaginamos al contemplar un arco iris. La radiación electromagnética no sólo puede quemarnos sino que además tiene fuerza.

Imaginemos un centímetro cúbico de materia en el centro del Sol. El gas está allí tan comprimido que contiene 160 g de materia a una temperatura de 15 millones de grados. La materia cuando está tan caliente emite radiación térmica con una intensidad terrible. La radiación y la materia coexisten pacíficamente en el Sol, y la radiación desempeña un papel subordinado.

Supongamos que pudiéramos hundir en el centro del Sol un pequeño dado de cristal vacío, olvidando que sus paredes se fundirían y vaporizarían por las elevadas temperaturas. La materia no puede atravesar las paredes del dado, por lo tanto éste se llenará a través de sus paredes transparentes únicamente de radiación. Transformemos ahora mentalmente las paredes del dado en espejos para no perder la radiación que acabamos de tomar del centro del Sol. Si sacamos el dado los rayos de luz permanecerán presos dentro de él, puesto que sus caras los reflejarán si intentan salir fuera.

Estudiemos ahora con mayor detenimiento la radiación que hemos pescado del Sol y que tenemos atrapada en la ratonera. Aunque en el dado hay muchos rayos de luz visible, hemos capturado principalmente rayos X. La radiación térmica a los 15 millones de grados está compuesta principalmente de rayos X. Lo que sorprende luego en nuestro experimento mental es que resulta casi imposible dominar esta radiación. La radiación cautiva podría reventar perfectamente el recipiente. Para impedirlo las paredes del dado deberían resistir una presión de 126 millones de atmósferas. Si nuestro dado tuviera en su parte superior una tapadera abatible, habría que cargar cada centímetro cuadrado de la superficie de esta tapadera en el campo gravitatorio de la Tierra con un peso de 126.000 toneladas. Tan enorme es la presión que ejerce esta radiación cautiva.

¿A qué se debe que la radiación ejerza una presión? La presión de la radiación sólo se hace notar cuando las temperaturas son muy altas, como en el interior de las estrellas. La radiación ejerce una presión porque ella también es materia. Imaginemos una puerta abierta contra la cual un grupo de escolares echa continuamente pelotas de tenis. La multitud de pelotas de tenis que rebotan contra la puerta la pondrán en movimiento, porque las pelotas tienen una masa y al rebotar ejercen una presión sobre la puerta. El efecto sería mucho menor si las pelotas tuvieran una masa inferior, por ejemplo si fueran pelotas de ping pong. También la radiación que hemos atrapado en el dado ejerce una presión. Cuando un rayo de luz no puede atravesar una de las paredes especulares del dado y retrocede hacia atrás, ejerce una presión sobre la pared exterior, igual que la pelota de tenis al rebotar contra la puerta. Los rayos de luz tienen masa, por pequeña que sea. En nuestro dado no hemos capturado mucha masa. Recordemos que en el centro del Sol hay 160 g de materia en un centímetro cúbico. En cambio la radiación que hemos capturado es pequeña. En un centímetro cúbico sólo se encuentra una millonésima de gramo de «masa de radiación».

Desde que Albert Einstein expuso en 1905 su teoría especial de la relatividad se sabe que la frontera entre la radiación electromagnética y la materia es fluida, que la luz es también masa y que, a la inversa, también la masa puede ser convertida en radiación. La transformación de la materia en radiación es un proceso importante en la obtención de energía nuclear. Comprobamos así que poder transformar la materia en energía significa disponer de una generosa fuente de energía. El hecho tuvo una confirmación terrible. Cuando en agosto de 1945 explotó la bomba atómica sobre Hiroshima muriendo miles de personas sólo se transformó un gramo de materia en radiación. Basta menos de un gramo de materia para aniquilar una ciudad y a muchos de sus habitantes.

El Sol entrega cada segundo al Universo luz y calor en forma de radiación, por lo tanto también pierde masa. En conjunto el Sol pierde cada segundo por radiación unos cuatro millones de toneladas. Si se recuerda que el Sol emite desde hace

4.500 millones de años con la misma intensidad más o menos que ahora, sorprende que todavía quede algo del Sol. Pero la masa solar es tan enorme que hasta ahora apenas le ha afectado la radiación que ha emitido. Durante toda su historia el Sol ha perdido como máximo tres diezmilésimas partes de su masa.

Cuando la masa se transforma en energía el proceso es muy productivo: un poco de masa se convierte en mucha radiación. Pero no solamente la materia puede transformarse en radiación, sino que también puede darse el proceso inverso: que la radiación se transforme en materia.

La radiación se convierte en materia y la materia en radiación

Esta posibilidad, como tantos descubrimientos de nuestra física actual, se encuentra ya en Einstein. Cosas tan distintas como la masa y la radiación son manifestaciones de la energía, y una puede transformarse en la otra. Ya hemos visto antes que se necesita poca materia para crear mucha energía. Es lógico pues que se necesite mucha radiación para conseguir un poco de materia. Desde el año 1934 se sabe cómo se transforma la radiación en materia.

En aquel año se descubrió que la materia puede crearse a partir de rayos gamma de gran energía. Dicho con más exactitud: se descubrió que en los rayos gamma se forma un par de partículas, un electrón, es decir una partícula de carga negativa, y una partícula llamada *positrón*. Esta partícula tiene carga positiva y posee la misma masa que el electrón. Pueden formarse pues partículas materiales a partir de la radiación electromagnética, es decir, convertirse la radiación en materia. También es posible el proceso inverso. Si un electrón y un positrón se encuentran, se transforman en radiación: desaparecen conjuntamente en un destello de radiación gamma. La radiación electromagnética en el dominio de los rayos gamma puede pues condensarse y generar dos partículas que si más tarde vuelven a encontrarse se convertirán de nuevo en radiación electromag-

nética. Veremos luego que el proceso de conversión de la radiación en partículas materiales debió desempeñar un papel importante en los inicios del Universo. Es posible incluso que toda la materia del Universo actual se originara en forma de radiación electromagnética, incluso la materia que constituye ahora nuestros cuerpos.

El positrón, nacido conjuntamente con el electrón en un destello de rayos gamma, es también para nosotros un nuevo tipo de materia. Si los electrones pertenecen en cierto modo a la vida diaria, los positrones son partículas exóticas. Cuando un positrón llega a las proximidades de un electrón, ambas partículas se convierten en un destello conjunto de radiación. El positrón es el primer representante de una especie de antimateria formada por partículas contrapuestas a las de nuestra materia usual. No solamente tiene el electrón su antipartícula; los demás elementos básicos de la materia tienen también sus compañeros en el antiuniverso. El protón positivo tiene un *antiprotón* negativo, el neutrón tiene el *antineutrón*. Antiprotones y antineutrones pueden formar antinúcleos atómicos alrededor de los cuales giran positrones, al igual que los electrones giran alrededor de los núcleos atómicos formados por protones y neutrones. El átomo más simple formado por antipartículas es el antihidrógeno: un positrón girando alrededor de un antiprotón. Podemos imaginar un Universo entero de antimateria, donde todo transcurrirá como en el nuestro mientras la antimateria no entre en contacto con la materia, pues cuando una antipartícula se encuentra con una partícula de materia normal ambas partículas se transforman en radiación gamma.

Podemos imaginar la gran potencia explosiva que tendría este nuevo tipo de materia si pudiera fabricarse en grandes cantidades. Medio gramo de antimateria guardado en cualquier lugar, en una botella o en el hueco de la mano, se uniría con medio gramo de materia normal, de la botella o de la mano, y produciría un destello de radiación de una potencia igual a la bomba de Hiroshima.

Por suerte no es tan fácil disponer de esta explosiva antimateria. Es asombroso que la antimateria exista únicamente de

modo esporádico en el Universo. Sólo aparece creada pasajeramente por partículas de alta energía o por radiación de alta energía, y al parecer prefiere desaparecer de nuestro Universo lo más rápidamente posible. La reserva natural de antimateria parece ser casi nula. Volveremos a discutir este hecho asombroso en el capítulo 12.

Sin embargo, es posible que haya gran cantidad de positrones en la Vía Láctea. Se ha observado concretamente una línea de emisión de radiación gamma con una frecuencia[6] muy determinada en la dirección del centro de la Vía Láctea. ¿A qué puede deberse esta radiación? Quizás a los positrones. Cuando un positrón se encuentra en el espacio con un electrón, las dos partículas efectúan primero una danza antes de desaparecer y transformarse en un destello de radiación. El electrón tiene carga negativa y el positrón positiva, por lo tanto las dos partículas se atraen mutuamente y giran una alrededor de la otra como la Tierra y la Luna o como dos estrellas de un sistema estelar doble. El electrón gira alrededor del positrón al igual que el electrón negativo gira alrededor del protón positivo en un átomo de hidrógeno.

Pero este idilio no dura mucho tiempo. Menos de una millonésima de segundo después, las dos partículas se convierten en radiación. En el 25% de los casos se generan dos destellos gamma con la frecuencia de la radiación observada procedente del centro de la Vía Láctea. ¿Nos indica quizá la línea de emisión gamma que en el centro de nuestro sistema galáctico se une la materia (electrones) con la antimateria (positrones)? En caso afirmativo, ¿de dónde proceden los positrones? Al parecer los positrones están allí en cantidades tan inmensas que nosotros podemos captar los rayos gamma que generan a pesar de la enorme distancia. Este nuevo fenómeno aumenta el misterio que envuelve el centro de la Vía Láctea.

---

[6] No vamos a dar aquí esta frecuencia. Expresada en MHz sería un número de quince cifras. Según una unidad de los físicos que no utilizaremos más en esta obra, puede decirse que la línea gamma observada está situada en los 511 kiloelectronvoltios (k*e*V).

Debo añadir, sin embargo, que las mediciones de los rayos gamma son muy difíciles y que es preciso mejorar las observaciones de la línea de emisión gamma del centro de la Vía Láctea para que sean convincentes.

Este capítulo se ocupa de la radiación electromagnética. Pero la radiación puede convertirse también en materia, por lo tanto también ésta última es un tema a considerar. La separación de la radiación y de la materia tuvo probablemente un importante papel en el inicio del Universo.

La energía en la luz y en la materia

La materia está formada por partículas: son los átomos, que generalmente se reúnen formando grupos mayores, las moléculas. Los mismos átomos son agrupaciones de electrones, protones y neutrones. La materia está formada pues por pequeños elementos que a su vez están compuestos por subelementos. Pero también la radiación electromagnética está formada por elementos. Un rayo de luz está compuesto de muchos *cuantos de luz* o *fotones*. Es difícil entender que por una parte la luz tenga naturaleza ondulatoria y que por otra pueda estar compuesta también por partículas. Tuvieron que pasar siglos para que pudiéramos comprender la naturaleza de la luz. Cada fotón es una especie de tren individual de ondas con una frecuencia determinada. El tren de ondas tiene una longitud finita. Cuando tomamos el Sol nos llegan cada segundo miles de millones de fotones de distintas frecuencias. Si la luz solar cae sobre una planta, cada fotón entrega una pequeña porción de energía solar a las células de la planta. Cada cuanto de radiación contiene energía.

También los electrones, es decir, las partículas materiales, contienen energía. Cuando un electrón se desplaza por el espacio tiene energía cinética, como todo cuerpo en movimiento. El electrón al frenarse pierde energía cinética. Entonces se forma un fotón que se lleva consigo esta energía. De este modo se produce la radiación térmica a partir de la energía cinética de los electrones de un gas caliente. Cuando un electrón se frena

hasta quedar inmóvil en relación a su entorno, su energía cinética se ha agotado. A pesar de ello el electrón no carece ni mucho menos de energía. Dispone todavía de una gran reserva de energía, relacionada con el hecho de que el electrón tiene masa. Para liberar esta energía se precisa de un antielectrón, es decir, de un positrón. Cuando el electrón se toca con el positrón libera su energía, la energía de que dispone todavía a pesar de estar en reposo. Esta energía recibe el nombre de *energía en reposo*. Puesto que la energía y la masa son la misma cosa, puede decirse también que el electrón emite su *masa en reposo*. Por lo tanto, un electrón en movimiento tiene dos tipos de masa, la masa en reposo y una masa que se deriva de la energía cinética. La masa de la energía cinética es fácil de radiar, basta con frenar el electrón. Para liberar la energía en reposo hay que recurrir a las antipartículas.

La luz es diferente. Los fotones se desplazan siempre a la velocidad de la luz y es imposible frenarlos y dejarlos en reposo. La energía de los cuantos de luz está en su frecuencia. Los cuantos de frecuencias más altas disponen de mayor energía que los cuantos de frecuencias inferiores. Esta regla puede expresarse de otro modo: cuanto mayor sea la longitud de onda de una partícula luminosa, menor será su energía y más pequeña su masa, masa que puede medirse por ejemplo mediante la presión de la luz. Por lo tanto, entre los electrones y los cuantos de luz hay una gran diferencia. Al pasar a cuantos de luz de longitud de onda cada vez mayor, es decir menos energéticos, su masa se hace cada vez más pequeña. Al pasar a electrones cada vez más lentos, su masa también se reduce, pero les queda en reserva la masa en reposo. Dicho de un modo algo diferente: las partículas de luz no tienen masa en reposo. Se diferencian en esto de los protones, los neutrones y la mayoría de partículas elementales. Puede decirse pues que en la naturaleza hay partículas de tipo luminoso, las que carecen de masa en reposo, y partículas de tipo material, las que tienen una masa en reposo finita. Hay una partícula de la que no se sabe con certeza a qué grupo pertenece: es el *neutrino*. Veremos luego en el capítulo 12 que tiene una gran importancia para la estructura de nuestro Universo saber si el neutrino es una partícula de tipo luminoso

o material. Si perteneciera a este último tipo su masa en reposo sería finita y posiblemente influiría sobre el destino de todo el Universo.

Hemos partido de la Vía Láctea y hemos llegado a la luz porque casi todo lo que sabemos sobre el Universo se lo debemos a ella. No sólo podemos ver lo que hay fuera, en el espacio, sino que además los espectros nos informan de otros detalles: nos revelan la naturaleza de la materia que brilla en las estrellas y su temperatura. Como veremos en el siguiente capítulo, la radiación en el dominio visible y en el dominio de radio nos informa también sobre cómo se mueven los cuerpos en el Universo, incluso cuando están tan lejos que su posición en el cielo no cambia de modo apreciable. Gracias a la radiación hemos podido reconocer el movimiento de nuestro sistema galáctico.

La Vía Láctea con todas sus estrellas, nebulosas gaseosas, brazos espirales y su misterioso centro, parece un objeto inmóvil, tal como lo hemos visto en el sueño del señor Meyer del capítulo anterior. Pero esta impresión es falsa, porque el sistema galáctico está en constante flujo. Es culpa nuestra que no podamos captar este hecho directamente. Vivimos demasiado deprisa y demasiado brevemente. Los miles de millones de estrellas que se han reunido para formar este disco plano dan vueltas al centro siguiendo lentas trayectorias. El Sol, que probablemente nació hace 4.500 millones de años, ha dado dieciocho vueltas al centro de la Vía Láctea. Estuvimos por última vez hace 250 millones de años en el lugar del disco galáctico que ocupamos ahora. En aquella época crecían sobre la Tierra las primeras coníferas. Ahora, después de haber dado una vuelta entera, tememos que las coníferas desaparezcan de nuevo.

III. LA VÍA LÁCTEA EN TIEMPO ACELERADO

—¡Mire! —dijo él abriendo la mano que sostenía el vaso. Como es lógico me precipité hacia adelante porque creía que el vaso se rompería al caer al suelo. Pero el vaso no pareció moverse; se quedó colgando inmóvil en el aire. Gibberne dijo: —Un objeto cae en el primer segundo aproximadamente cinco metros. Pero este vaso hasta ahora sólo ha caído una centésima de segundo; esto le dará una idea de la velocidad de mi acelerador.

Dio dos pasadas con la mano alrededor del vaso que caía lentamente, y luego lo cogió y lo depositó sobre la mesa.

H. G. WELLS.
El nuevo acelerador

El sueño de su viaje en una nave espacial continuó ocupando al señor Meyer en los días siguientes. La Vía Láctea, vista tanto desde fuera como desde dentro, me ha parecido inmóvil e inalterable, pensó. Debería verla en tiempo acelerado. Recordó entonces haber leído una vez una historia de H. G. Wells protagonizada por una droga, el llamado acelerador, que una vez tomada aceleraba los procesos internos del hombre, todo su metabolismo, incluso el ritmo de percepción de los estímulos y el pensamiento; una droga que en definitiva lo aceleraba todo. Quien tomaba este fármaco sentía que el Universo se hacía tan lento en relación a sus sensaciones que al cabo de un tiempo todas las personas le parecían inmóviles o que se movían con una extrema lentitud para su sentido del tiempo. Con la Vía Láctea se precisa una droga contraria, pensó el señor Meyer; un desacelerador que haga muy lentos nuestros procesos internos, de modo que los procesos externos que nos parecen lentos transcurran con rapidez. Si pudiera contemplar la Vía Láctea después de tomar una droga así, vería moverse las estrellas.

Se había hecho tarde, después de un largo día lleno de trabajo. El señor Meyer acababa de pensar precisamente en la droga del tiempo acelerado cuando en el instante siguiente no supo si lo soñaba o si acababa de tomársela, pero estaba de nuevo en la nave espacial. Ahora todo le parecía familiar. El astronauta estaba ya allí y le sonrió.

Novas y supernovas

La nave espacial estaba ahora algo por fuera del disco de la Vía Láctea, que el señor Meyer contemplaba desde la ventana. Por efectos de la droga el ritmo de los procesos en la Vía Láctea se había acelerado primero mil veces y luego hasta cien mil veces, y él pudo ver que el brillo de algunas estrellas cambiaba rápidamente. Descubrió algunas estrellas que pulsaban con regularidad. Su brillo aumenta y disminuye normalmente al cabo de unos días, pero para él todo sucedía en segundos. Pero aquello eran cambios de brillo, no movimientos. El mundo de las estrellas continuaba inmóvil. El señor Meyer al mirar con mayor atención descubrió continuamente nuevas estrellas que aumentaban de brillo. Esto sucedía para él en el conjunto de la galaxia en promedio cada diez segundos, y de modo totalmente irregular, primero en un punto del disco, luego en cualquier otro. Durante diez a veinte segundos la radiación de la estrella afectada aumentaba de diez a cien mil veces. Luego continuaba brillando como si nada hubiese pasado. Nosotros vemos este fenómeno desde el punto de observación desfavorable de la Tierra, y las masas de polvo opacas del disco de la Vía Láctea nos impiden generalmente verlo. De todos modos, desde la Tierra podemos ver dos fenómenos de este tipo por año. Reciben el nombre de *novas*. Pero continuemos observando pacientemente con el señor Meyer el Universo estelar en tiempo acelerado.

El señor Meyer vio que en el disco de la Vía Láctea se ponía una estrella a brillar tanto que durante este tiempo era tan luminosa como toda la galaxia. Le pareció que la estrella sólo

brillaba de 10 a 20 s, pero esto se debía a la droga desaceleradora. Lo que había visto era una *supernova*, un fenómeno que deja muy a la sombra el de las novas. Transcurrido un tiempo después de su erupción como nova, la estrella parece radiar como antes, como si nada hubiese pasado. En cambio un fenómeno de supernova deja la estrella al parecer totalmente destrozada. La estrella, sea cual fuere su fin, ya no es lo que había sido antes. Probablemente acaban así todas las estrellas que tienen bastante más masa que nuestro Sol.

Nosotros, que observamos nuestro sistema galáctico desde la Tierra sin la droga del tiempo acelerado, tenemos que esperar mucho para poder ver encenderse una supernova. Las dos últimas registradas históricamente aparecieron en el cielo en los años 1572 y 1604. Las vieron y las describieron los famosos astrónomos Tycho Brahe y Johannes Kepler. Nos hemos perdido muchas explosiones de supernova en nuestro sistema galáctico, porque el proceso tiene lugar detrás de espesas nubes de polvo. Sin embargo tenemos noticias de algunas de ellas, pues la nube explosiva en la que parece disolverse la estrella continúa emitiendo intensas señales de radio durante milenios. Sabemos que las ondas de radio atraviesan el polvo. También se ven brillar supernovas en otras galaxias. Así en agosto de 1885 apareció cerca del centro de la nebulosa de Andrómeda una estrella que era una supernova de nuestra galaxia vecina.

Pasó mucho tiempo hasta que descubrimos que hay dos tipos de estrellas explosivas: las inofensivas novas cuya luminosidad aumenta quizá veinte mil veces, y las supernovas que de repente multiplican por más de mil millones su potencia emisora. La explosión de una nova sigue un curso relativamente inofensivo. La estrella al cabo de un tiempo vuelve a brillar igual que antes de la explosión, como si nada hubiera pasado. En cambio, al parecer, una explosión de supernova significa el fin de la vida de una estrella.

Es comprensible la confusión entre novas y supernovas, que ha desempeñado un papel perturbador en nuestra comprensión de la naturaleza de las nebulosas espirales. Cuando se ve brillar de pronto una estrella con mayor intensidad, no se sabe si es una nova o una supernova hasta que se conoce la distancia

que la separa de nosotros. Una nova que brille de repente cerca de nosotros puede parecer en el cielo mucho más espectacular que una supernova situada a mayor distancia. Después de observar la supernova del año 1885 en la nebulosa de Andrómeda pudieron descubrirse ya en nuestro siglo novas débiles en aquella galaxia, y así se supo que en realidad se trataba de dos fenómenos distintos que era preciso distinguir.

El disco en rotación

La droga del tiempo que aceleraba cien mil veces los procesos de la Vía Láctea en la conciencia del señor Meyer, le había permitido ver plásticamente las explosiones de novas y de supernovas. Sin embargo, el disco de la Vía Láctea continuaba pareciéndole inmóvil. La droga tuvo que acelerar novecientos mil millones de veces los procesos que tenían lugar alrededor del señor Meyer para que éste pudiera ver el disco galáctico girando alrededor de su centro. Todas las estrellas de la Vía Láctea giran alrededor de su punto central, pero esta rotación no es rígida.

Las estrellas situadas a mayor distancia del centro necesitan para dar una vuelta más tiempo que las estrellas más próximas. Al moverse la estrella, la fuerza centrífuga la empuja hacia fuera, mientras que la atracción gravitatoria de la parte interior de la galaxia la atrae hacia el centro. La rotación equilibra ambas fuerzas. Pasa exactamente lo mismo en el movimiento de la Tierra alrededor del Sol. El Sol quiere arrastrarnos hacia él con su fuerza gravitatoria, y la fuerza centrífuga quiere proyectarnos hacia fuera, lejos del Sol. Ambas fuerzas se equilibran y así la Tierra traza desde siempre órbitas casi circulares alrededor de nuestra estrella madre. Las estrellas giran exactamente igual en el disco, alrededor del centro de la Vía Láctea.

Todo el disco de la Vía Láctea gira. El señor Meyer observó sus brazos espirales. También los brazos se movían, pero no lo hacían como las estrellas. Su movimiento parecía rígido. Por ejemplo, los brazos espirales no se van acercando cada vez más de modo que al final quedan retorcidos y apretados sin ningún

espacio intermedio. El señor Meyer al observar los brazos más atentamente descubrió que las estrellas se desplazan más deprisa alrededor del centro que las espirales; entran en la cara interior del brazo espiral y lo abandonan en su cara exterior (fig. 3-1). Gas y polvo atraviesan los brazos espirales acompañando las estrellas.

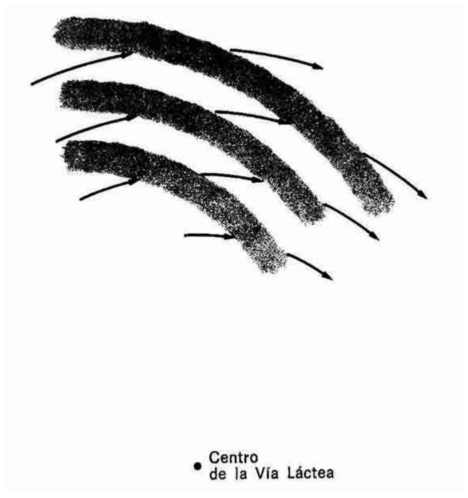


Fig. 3-1. Movimiento de las estrellas en relación a los brazos espirales de la Vía Láctea. Las estrellas del disco se desplazan alrededor del centro galáctico en órbitas casi circulares, como indican las flechas curvadas. Entran en la cara interior de los brazos espirales (bandas grises) y los abandonan por el otro lado. En las masas gaseosas que entran con las estrellas nacen nuevas estrellas que hacen brillar los brazos espirales.

¿Pero qué son los brazos espirales? El señor Meyer también pudo resolver este problema observando el disco con detenimiento. En los brazos se ponían a brillar de repente cúmulos enteros de luminosas estrellas azules, como los petardos luminosos de unos fuegos artificiales, e iluminaban el gas vecino que a su vez también se ponía a brillar; se trataba pues de cúmulos estelares recién nacidos. Mientras hubiera representantes luminosos y azules de las estrellas nuevas, las regiones en

donde hacían su aparición parecían más brillantes que las restantes regiones del disco.

Contribuían a este brillo no sólo las estrellas sino también las masas de gas que brillaban estimuladas por ellas.

Los brazos espirales son pues los lugares en donde se forman en cada momento nuevas estrellas. Estas estrellas iluminan el brazo espiral y le dan su aspecto claro. Más tarde las jóvenes estrellas, que están perdiendo brillo lentamente, abandonan el brazo, mientras que en su cara interior se ponen a brillar nuevas estrellas azules. Los brazos no están pues formados siempre por la misma materia, son un *estado.* Sucede lo mismo en una llama de gas. Tampoco ella está formada siempre por los mismos átomos, sino que la atraviesa una corriente. El gas de la llama está también en un estado determinado. Se combina allí con oxígeno y por ello brilla. Los brazos espirales son pues como llamas. Las estrellas emiten allí su luz durante los millones de años de su juventud, y esta luz hace destacar con claridad las espirales del disco de la Vía Láctea. El señor Meyer, gracias a sus procesos internos más lentos, pudo ver perfectamente el fenómeno.

El señor Meyer estaba fascinado por el espectáculo de la gigantesca rueda galáctica girando lentamente, y no podía apartar su mirada de ella. Lo que más le cautivaba era el centro. Él estaba mirando el disco desde fuera, y su mirada podía llegar así sin obstáculos hasta el centro. Vio los millones de estrellas que nosotros, desde nuestro punto de observación de la Tierra, sólo podemos imaginar gracias a que captamos mucha radiación infrarroja procedente de aquella zona. Ninguna nube de polvo impedía la visión del señor Meyer, y así podía ver las estrellas, y no únicamente la radiación infrarroja del polvo calentado por ellas. Era un enorme cúmulo estelar que no podía resolverse en estrellas individuales ni con el telescopio de la nave espacial.

El señor Meyer pudo observar que en las proximidades del centro no sólo las estrellas trazaban órbitas circulares alrededor del punto centro, sino que también se movían alrededor de este centro las masas de gas situadas en el plano central del disco.

Le pareció ver brotar corrientes de gas del centro, y le sorprendió ver un anillo de nubes rodeando este centro. Le costó reconocer las masas gaseosas, pero vio claramente que este anillo se ensanchaba y crecía. Las nubes, formando un gran anillo de humo en rotación, se alejaban del centro en todas las direcciones del plano central de la galaxia, como si procedieran del mismo centro. El volcán de Jules Verne todavía humeaba.

Dos grupos de población

Pero el disco, acelerado novecientos mil millones de veces, mostró al señor Meyer otro fenómeno sorprendente. Mientras las estrellas de la Vía Láctea tardaban en promedio una hora en dar una vuelta al centro, aparecían en los lugares más variados destellos puntuales de luz, en total unos 500 por segundo, cada uno de los cuales brillaban sólo una diezmilésima de segundo. Eran las supernovas, las estrellas explosivas. Mirara donde mirara el señor Meyer, la galaxia emitía por todas partes destellos de luz mientras giraba lentamente. La rueda galáctica destellaba y chispeaba. Aparte de esto cada segundo se ponían a brillar con mayor fuerza millones de novas, difíciles de distinguir para el señor Meyer. Cada nova era una explosión, pero, contrariamente a las supernovas, contribuían poco a la luz de la galaxia.

De pronto entró por la ventana una luz intensa. El señor Meyer no sabía de dónde venía, pero de repente pasó ante la ventana de la cabina una densa concentración de estrellas. Debe de contener centenares de miles de estrellas, pensó él. Antes de que el señor Meyer pudiera recuperarse, el enorme enjambre de estrellas había ya desaparecido. Pero pudo ver que las estrellas del interior del enjambre también se movían. Siempre había alguna estrella que quería escapar del enjambre, pero antes de que se hubiera aventurado lejos del borde exterior de aquel objeto esférico, una especie de fuerza la frenaba y la obligaba a moverse hacia el centro. El señor Meyer acababa de ver pasar un cúmulo estelar globular delante de la nave espacial (fig. 3-2). El cúmulo estelar continuó volando hacia la galaxia.

El señor Meyer comprendió que la nave espacial al flotar fuera del disco de la Vía Láctea se había situado entre los cúmulos estelares (fig. 3-3). Vio entonces otros cúmulos, y miró a su alrededor con aprensión por si algún enjambre estelar ponía en peligro la nave espacial.

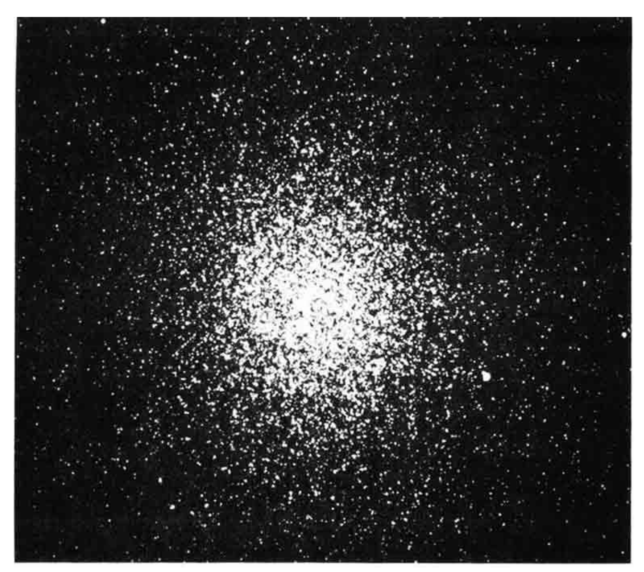


Fig. 3-2. El cúmulo estelar globular Omega Centauri está a 5 kpc de nosotros en el halo de la Vía Láctea (Fotografía: P. E. Nissen, Observatorio Europeo Austral.)

Los cúmulos estelares se mueven. Impulsados por la gravedad se precipitan contra el disco y lo atraviesan. El señor Meyer creía que algunas estrellas del cúmulo estelar al atravesar el disco chocarían con otras estrellas del disco, y esperó verlo. Pero no pudo observar nada raro.

Las densidades estelares, incluso en las regiones más pobladas de la Vía Láctea, e incluso en los cúmulos globulares más compactos, son siempre tan bajas que prácticamente no hay choques. Los cúmulos globulares atraviesan realmente el disco de la Vía Láctea, pero ninguna estrella choca con otra.

Los cúmulos salen por el otro lado del disco galáctico y se alejan de él, hasta que la atracción de nuestro sistema estelar les obliga a dar la vuelta y a precipitarse de nuevo en dirección contraria hacia el disco de la Vía Láctea (fig. 3-3). El señor Meyer vio cúmulos globulares salir disparados del disco y caer de nuevo a él.

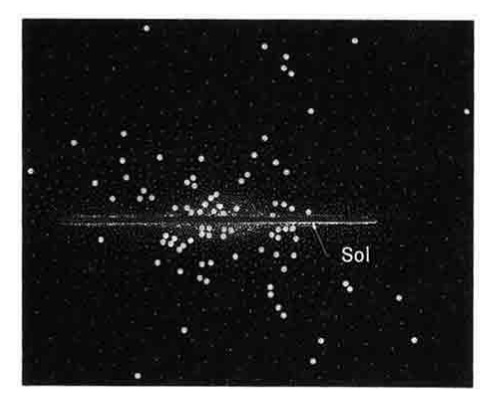


Fig. 3-3. Nuestra galaxia Vía Láctea vista de lado (esquemáticamente). Nosotros ocupamos con el Sol el lugar marcado por una flecha en el disco lleno de estrellas, que parece dividido en dos partes por capas opacas de polvo cercanas al plano central. Las estrellas del disco se mueven en este disco alrededor del centro con un movimiento lento y casi circular. Además, las estrellas del halo (pequeños puntos aislados) llenan un dominio esférico. Allí están también los cúmulos globulares (puntos gruesos aislados). Los objetos del halo se mueven hacia el centro del disco, pasan a gran velocidad por el disco y salen por el otro lado, para invertir su movimiento al cabo de un tiempo, dirigirse de nuevo hacia el disco y pasar al otro lado. Las estrellas más brillantes del halo son rojas, las estrellas más brillantes de la población del disco son rojas o azules.

Los movimientos le permitieron descubrir que en nuestro sistema galáctico hay dos grupos de poblaciones estelares. Están en primer lugar los habitantes del disco que recorren sus órbitas casi circulares alrededor del centro. El Sol pertenece a este grupo. También forman parte de él las estrellas jóvenes,

azules y brillantes de los brazos espirales y muchas de las estrellas pulsantes que habían llamado la atención del señor Meyer. En el disco se mueven también cúmulos estelares sueltos, como el grupo de las *Pléyades*, que puede reconocerse a simple vista en el cielo. Todas las estrellas del disco forman parte de la *población del disco*.

Hay además estrellas que suelen estar fuera del disco, que sólo ocasionalmente pasan de un lado al otro y que por lo tanto se mantienen próximas a las estrellas del disco durante corto tiempo. El dominio espacial a ambos lados del disco está habitado no sólo por los cúmulos globulares, sino también por estrellas individuales. Se observan estrellas y cúmulos globulares incluso a gran distancia del disco, envolviéndolo como un gigantesco enjambre de mosquitos. Se llama *halo* de la Vía Láctea el espacio que contiene todas estas estrellas solas y estos cúmulos globulares. Este halo forma como una gran esfera centrada en el punto medio del disco, y las estrellas que no pertenecen al disco forman parte de la *población del halo*. También esta población contiene estrellas pulsantes, y también en el halo estallan supernovas. Las estrellas más brillantes del halo son rojas, en cambio entre las habitantes más brillantes del disco cuentan además de estrellas rojas las estrellas jóvenes y azules de los brazos espirales.

El señor Meyer acababa de comprobar hasta qué punto nuestro sistema galáctico es un objeto vivo. Esta idea continuó ocupando su mente después de despertarse.

Las ondas luminosas y de radio revelan movimientos

Volvamos un poco al último sueño del señor Meyer. Le he hecho ver cosas cuyo conocimiento ha costado a la investigación mucho tiempo. No hemos obtenido estos conocimientos soñando. Sin embargo sabemos muchas cosas sobre el movimiento del disco de la Vía Láctea gracias a una propiedad de las ondas luminosas y de radio, el *efecto Doppler*. Se basa en que la luz no se propaga con una velocidad infinita, sino que lo hace con velocidad finita. Este erecto sólo puede captarse con

mediciones cuidadosas. Si la luz se desplazara por el espacio con mucha mayor lentitud, todos conoceríamos el efecto Doppler, pues se nos manifestaría provocando en nuestras vidas diarias fenómenos muy notables. Nos lo demostrará otro sueño del señor Meyer.

El señor Meyer en bicicleta

El señor Meyer estaba disfrutando con la lectura de un nuevo libro. Había leído ya otras historias de George Gamow sobre Mr. Tompkins. Ahora tenía en sus manos una colección completa, con comentarios del físico vienes Roman U. Sexl.

El señor Meyer había leído la primera historia, la historia de la ciudad donde la velocidad de la luz era tan baja que podía darle alcance un ciclista si pedaleaba con fuerza. En la noche siguiente el mismo Meyer recorrió esta ciudad en bicicleta. Estaba a punto de dejar los barrios habitados y entrar en un bosque de los alrededores. Le sorprendió entonces ver que el bosque no era verde sino azul. Aceleró para descubrir qué tipo especial de árbol crecía allí. Pero el bosque se volvió violeta. El señor Meyer vio que delante del bosque había una fragua. El herrero hacia el cual corría tenía el rostro azul y su martillo golpeaba con un ritmo innatural y rápido un trozo de metal al blanco. El señor Meyer se maravilló de que el trozo de hierro caliente, cuyo color le recordaba el del acero fundido, no fuera líquido, sino sólido, pues el martillo rebotaba después de cada golpe. El hierro al blanco parecía desde luego muy duro. El señor Meyer se detuvo y bajó de su bicicleta. De repente la fragua se oscureció, el herrero frenó el ritmo de sus golpes, el color de su piel volvió a la normalidad y el bosque del fondo tomó un color verde oscuro. El trozo de hierro parecía ahora brillar al rojo.

El señor Meyer vio entonces que se le acercaba otro ciclista procedente de la fragua. El rostro del ciclista brillaba con un color verde azulado. No era de extrañar, pues pedaleaba a buen ritmo. Se detuvo delante del señor Meyer y al instante su piel se volvió rosada.

—Me alegra verle tan natural —dijo— Cuando me acerco con la bicicleta a las personas, todas tienen un color verde azulado como el de usted hace poco.

El señor Meyer ignoraba que su aspecto hubiese cambiado.

—Por cierto, mi nombre es Tompkins -dijo el recién llegado— Veo que pone cara de sorpresa, probablemente porque ha llegado recientemente a la ciudad. Al principio me pasó también lo mismo. Venga a mi casa. Se lo explicaré todo.

Subió de nuevo a su bicicleta y el señor Meyer le siguió. Los dos iban a la misma velocidad. El señor Tompkins presentaba ahora para el señor Meyer un aspecto perfectamente normal, por lo menos en cuanto al color de su piel. El señor Meyer giró la cabeza para mirar la fragua. Estaba sumida en la oscuridad. El herrero tenía una piel de color rojo oscuro, el hierro ya no brillaba, el martillo se movía lentamente, el bosque era rojo.

—¿Quiere que hagamos una carrera? -le preguntó el señor Tompkins, y sin esperar respuesta se disparó hacia adelante. El señor Meyer no se sentía muy bien en aquel nuevo entorno, pues las casas de las afueras de la ciudad le parecían deformadas e inclinadas, y se quedó donde estaba. Lo que podía ver del señor Tompkins, la espalda y la nuca, se oscureció a ojos vista. Tampoco parecía que el señor Tompkins se esforzara mucho, pues movía las piernas lentamente. De repente el señor Meyer pudo ver a través del señor Tompkins, y un escalofrío le recorrió el espinazo. Sobre la bicicleta no iba ya el señor Tompkins, sino un esqueleto. El señor Meyer podía ver perfectamente a través de sus costillas la carretera de delante. El esqueleto continuó pedaleando. Al final se volvieron transparentes los huesos e incluso la bicicleta. El señor Tompkins había desaparecido. El señor Meyer no sabía en qué punto de la ciudad debía encontrarse con él, y se quedó sin recibir explicaciones sobre sus extraordinarias experiencias. Sólo a la mañana siguiente, cuando se despertó, pudo recordar que la clave de su sueño estaba en la lectura de la noche anterior.

El efecto Doppler

El sueño del señor Meyer está relacionado con el ya citado efecto Doppler, un efecto que nosotros apenas percibimos. Cuando se emiten señales a intervalos regulares desde un punto, el tiempo que transcurre entre la llegada de dos señales consecutivas depende de cómo se desplace el emisor en relación a nosotros. Esto es válido para todas las señales que se transmiten con una velocidad determinada. Pueden ser las cúspides individuales de las ondas luminosas que emite un cuerpo y que se nos acercan a la velocidad de la luz, o las condensaciones regulares del aire generadas por la sirena de una ambulancia que pasa delante nuestro, que nos llegan a la velocidad del sonido y que percibimos como un sonido. Podrían también ser palomas mensajeras enviadas a intervalos regulares.

El presidente de la Asociación de Criadores de Palomas Mensajeras había decidido representar a su asociación en un congreso internacional de colombofilia. Cuando se despedía de su familia les prometió enviar cada mediodía una paloma con una carta. Para ello se llevó en su auto una cantidad suficiente de palomas. Escribió puntualmente sus cartas y las fue enviando por el camino con un animal, siempre a intervalos de 24 horas. Al principio las palomas llegaban a intervalos superiores a 24 horas, luego durante una semana a intervalos muy exactos de veinticuatro horas. Finalmente regresaron al palomar doméstico a un ritmo algo más corto. Cuando llegó el colombófilo viajero a casa lo primero que preguntó fue si todos los animales habían encontrado el camino.

El motivo de que al principio las palomas llegaran a intervalos superiores a 24 horas era que, al estar su amo todavía en camino, cada animal tenía que cubrir un trayecto superior al del animal del día anterior. Mientras el amo estuvo en el congreso, las palomas enviadas tenían que recorrer el mismo trayecto y llegaban al mismo ritmo con que eran enviadas. Cuando nuestro viajero emprendió el camino de regreso cada paloma tenía

que recorrer un trayecto inferior al del día anterior, por ello los animales llegaron a intervalos inferiores a 24 horas[7].

El principio aplicable a las palomas es también válido para las señales sonoras y luminosas y también para todo tipo de ondas electromagnéticas.

Imaginemos un emisor que emite radiación electromagnética de una longitud de onda determinada y fija, por ejemplo una nube de hidrógeno que emite en una longitud de onda de 21 cm, es decir, con una frecuencia de 1.428 MHz. Cada segundo no llegan pues 1.428 millones de cúspides de onda. Si la fuente se mueve hacia nosotros cada cúspide sucesiva de onda necesita un tiempo menor que el anterior, puesto que debe cubrir un trayecto menor. Por lo tanto las cúspides de las ondas nos llegan a intervalos temporales más cortos. La frecuencia nos parece más alta. Lo mismo sucede cuando nosotros nos desplazamos hacia la fuente de radiación. En la vida diaria este fenómeno apenas desempeña ningún papel, puesto que nuestras velocidades son pequeñas en relación a la velocidad de la luz. Es distinto el caso de la ciudad soñada del señor Meyer y de Mr. Tompkins. Allí la velocidad de la luz es tan reducida que un ciclista casi puede darle alcance. Todas las fuentes de radiación hacia las cuales se acerca corriendo le parecen de longitud de onda corta; el color rosado de la piel se vuelve verde azulado y azul, los bosques verdes se convierten en violetas. Cuando el ciclista se aleja de estos objetos la radiación se vuelve de gran longitud de onda; el color rosado de la piel se vuelve rojo oscuro, los bosques verdes se vuelven amarillos y rojizos.

Por pequeño que sea este efecto en la vida diaria, es medible. Si no con bicicletas por lo menos con las velocidades de la materia en el Universo. La medición resulta especialmente fácil cuando la fuente de radiación ofrece un espectro de líneas.

---

[7] Si la esposa del colombófilo hubiese anotado con exactitud los tiempos de llegada de las palomas y hubiese sabido algo de matemáticas, hubiese podido comprobar con una integración si su marido se quedaba siempre en el lugar que citaba en sus cartas.

En este caso las líneas, por ejemplo del dominio espectral visible, quedan desplazadas hacia las longitudes de onda más cortas (más azules) o hacia las más largas (más rojas), cuando las fuentes se acercan o se alejan de nosotros. Esto es válido tanto para las líneas de emisión como de absorción. En este último caso el movimiento de la materia absorbente determina si las líneas de Fraunhofer del espectro visible se desplazan, y hacia qué longitudes de onda lo hacen.

El desplazamiento aparente de la frecuencia de una fuente radiante según su estado de movimiento en relación al observador recibe el nombre de efecto Doppler por el físico austríaco Christian Doppler (1803-1853). Con este efecto puede saberse si las estrellas o las galaxias se acercan hacia nosotros o se alejan de nosotros. Con él pudo determinarse también el estado de movimiento del hidrógeno en la Vía Láctea.

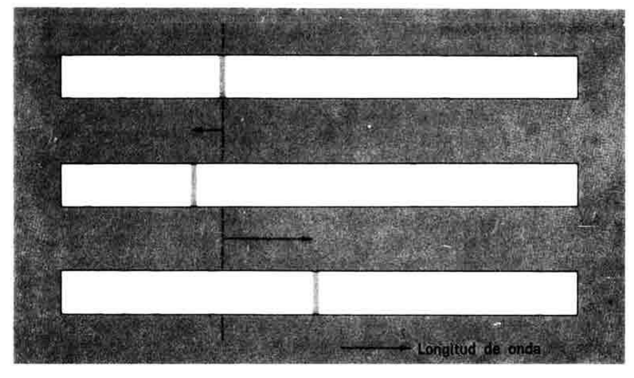


Fig. 3-4. Desplazamiento de las líneas de absorción del espectro debido al efecto Doppler. Arriba está dibujado el espectro de una estrella con líneas de absorción. A la derecha está el extremo rojo, a la izquierda el violeta, debajo el espectro tal como lo vemos cuando la misma estrella se acerca a nosotros. Las líneas están desplazadas hacia el extremo violeta. Abajo: desplazamiento hacia el rojo de las líneas de absorción cuando la estrella se aleja de nosotros. Para poder reconocer el desplazamiento de las líneas espectrales de una estrella hay que fotografiar el espectro simultáneamente con el de un cuerpo en reposo en relación al aparato de observación. (Ver la fig. 6-1.)

Volvamos ahora al trozo brillante de hierro de la fragua. Cuando nos acercamos a un cuerpo que emite radiación térmica, el color, debido al efecto Doppler, aparece más desplazado hacia el azul, como si el cuerpo estuviera más caliente. Se observa entonces una notable regularidad: El observador móvil ve todo el espectro continuo transformado de tal modo por el efecto Doppler que le parece como si fuera el de un cuerpo más caliente (ver la pág. 152). El señor Meyer pensó por ello al principio que el hierro estaba al blanco, luego que estaba sólo al rojo, es decir más frío, y en la tercera ocasión le pareció más oscuro y por lo tanto más frío todavía. El hecho de que un cuerpo caliente que se aleja de nosotros nos parezca más frío desempeñará más tarde, en el capítulo 12, un papel importante, cuando veamos que recibimos radiación térmica del Universo correspondiente a una temperatura de 3°K, la cual sin embargo procede de un gas que se aleja de nosotros con una velocidad próxima a la de la luz y con una temperatura propia de unos 3.000°K.

Nos falta explicar todavía cómo pudo alejarse el señor Tompkins tan espectralmente del señor Meyer en su sueño. El señor Tompkins en la carrera propuesta se acercó mucho a la velocidad de la luz (que en aquella ciudad era muy baja). Los rayos de luz procedentes del paisaje que tenía delante suyo le resultaron tan cortos que se situaron en el dominio de los rayos X. Esta radiación atravesó las partes blandas de su cuerpo. Pero para el señor Meyer, que estaba en reposo en relación al suelo, esta radiación conservaba la longitud de onda natural con que era emitida, y el señor Meyer pudo ver a través del señor Tompkins. Sólo continuaron siendo opacos para el señor Meyer los huesos de Tompkins, que los rayos X no atravesaban. Cuando el señor Tompkins aceleró todavía más, se acercó más a la (reducida) velocidad de la luz, y las ondas luminosas que le llegaban se transformaron en rayos gamma que atravesaron sus huesos. El señor Tompkins se hizo totalmente invisible.

Los movimientos de la Vía Láctea

El desplazamiento de las líneas de Fraunhofer en los espectros de las estrellas nos revelan si la estrella se acerca hacia nosotros o si se aleja de nosotros (fig. 3-4).

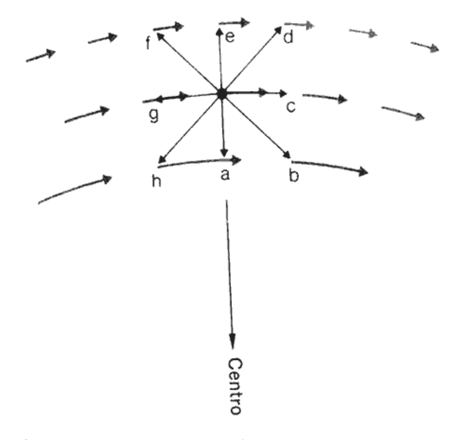


Fig. 3-5. Así se descubre con el efecto Doppler aplicado a nuestras estrellas vecinas que el disco de la Vía Láctea no gira rígidamente. Se han dibujado los movimientos de giro de estrellas situadas a tres distancias distintas del centro. El Sol (punto grueso en la mitad) efectúa su giro alrededor del centro junto con las otras estrellas que tienen la misma distancia al centro, en la órbita intermedia de las tres dibujadas. Cuanto menor es el radio de su órbita mayor es la velocidad orbital. Las estrellas en las visuales a y e se mueven paralelas a nosotros, es decir, transversalmente a la visual y no hay efecto Doppler. En las direcciones c y g vemos estrellas que tienen la misma velocidad de giro que el Sol, por lo tanto su distancia no cambia, y tampoco observamos ningún efecto Doppler. En la dirección h las estrellas se acercan al Sol, porque tienen una velocidad de giro superior a él, por lo tanto se observa un desplazamiento hacia el violeta de las líneas de Fraunhofer. En la dirección d nos acercamos con el Sol a las estrellas que hay allí, puesto que nuestra velocidad orbital es mayor. En las direcciones b y f las estrellas se alejan de nosotros, o al revés, y las líneas de Fraunhofer de las estrellas de esta dirección están desplazadas hacia el rojo.

Si la Vía Láctea girara como un disco rígido, por ejemplo como un disco gramofónico, cada una de sus estrellas se mantendría siempre a la misma distancia con relación a nosotros. Por lo tanto, ninguna estrella podría acercarse o alejarse de nosotros. El efecto Doppler no desplazaría las líneas espectrales de las estrellas ni hacia el rojo ni hacia el azul[8]. Pero en realidad observamos con ayuda del efecto Doppler que en la Vía Láctea hay dos direcciones principales desde las cuales las estrellas se nos acercan sistemáticamente y dos direcciones principales en las que se alejan de nosotros. Pero este efecto es de esperar si el disco no gira de modo rígido, como vemos en la figura 3-5.

Las radiofuentes cósmicas suelen tener un espectro continuo. Es una coincidencia afortunada que tengan líneas de emisión en frecuencias dadas, por ejemplo porque dentro de la fuente haya moléculas que emiten precisamente en estas frecuencias fijas. En tales casos puede explotarse también el efecto Doppler. Si la fuente se mueve hacia nosotros, las longitudes de onda de su emisión están desplazadas a longitudes de onda más cortas, si se alejan de nosotros a longitudes de onda más largas.

Si miramos ahora con un radiotelescopio el anillo nebuloso en expansión que había visto el señor Meyer en las proximidades del centro, comprobaremos que la radiación de las moléculas situadas entre el centro y nosotros se ha desplazado hacia las longitudes de onda cortas, mientras que la radiación de las moléculas situadas detrás del centro, desde nuestro punto de vista, se ha desplazado hacia las longitudes de onda largas (fig. 3-6). Por lo tanto, la mitad de la radiación molecular estará desplazada hacia las longitudes largas y la otra mitad hacia las cortas. Se ha podido medir precisamente este desplazamiento Doppler en las nubes de moléculas situadas cerca del centro. La magnitud del desplazamiento ha permitido calcular que el anillo nebular se expande con una velocidad de 150 kilómetros por segundo. El anillo tiene un radio de unos 200 pc; debemos

---

[8] Prescindamos ahora de que las estrellas, además de su movimiento de giro alrededor del centro de la Vía Láctea, tienen pequeños movimientos no unitarios en todas direcciones.

deducir pues que como máximo fue expulsado hace 1,2 millones de años, un intervalo temporal corto para nuestra Vía Láctea, que gira desde hace centenares de millones de años.

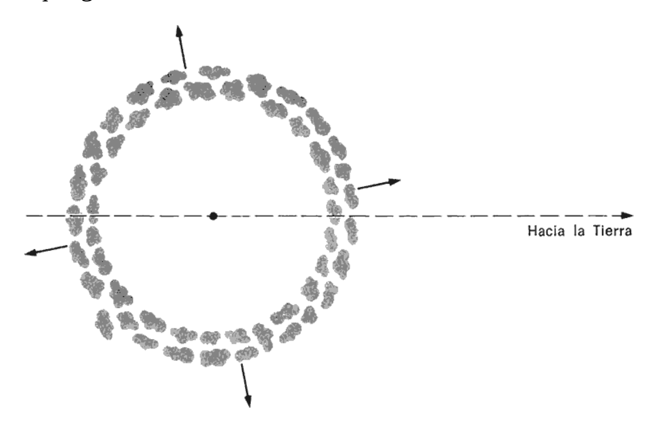


Fig. 3-6. Anillo de nubes moleculares en expansión alrededor del centro de la Vía Láctea (dibujo esquemático). Su radio mide unos 200 pc. Cuando desde la Tierra dirigimos radiotelescopios al centro, nuestro «rayo visual» atraviesa dos veces el anillo de nubes, primero allí donde la materia se acerca a nosotros y luego donde las nubes se alejan de nosotros. El efecto Doppler observado en los dos casos nos da una velocidad media de alejamiento de las nubes de 150 km/s.

No solamente pueden utilizarse las moléculas para estudiar los movimientos del gas en la Vía Láctea, sino también el hidrógeno normal con su línea de 21 cm. El hidrógeno del disco de gas de la Vía Láctea gira con las estrellas alrededor del centro, y partiendo del efecto Doppler de la línea de 21 cm, como hicimos antes con las estrellas, podemos deducir que el disco de gas tampoco gira rígidamente. Y no sólo esto. Mediante las ondas de radio podemos ver hasta el mismo centro de la Vía Láctea y estudiar no sólo los movimientos de las nubes que emiten radiación molecular sino también los del hidrógeno. El efecto Doppler nos permite pues ver (fig. 3-7) cómo gira la parte más interior del disco gaseoso.

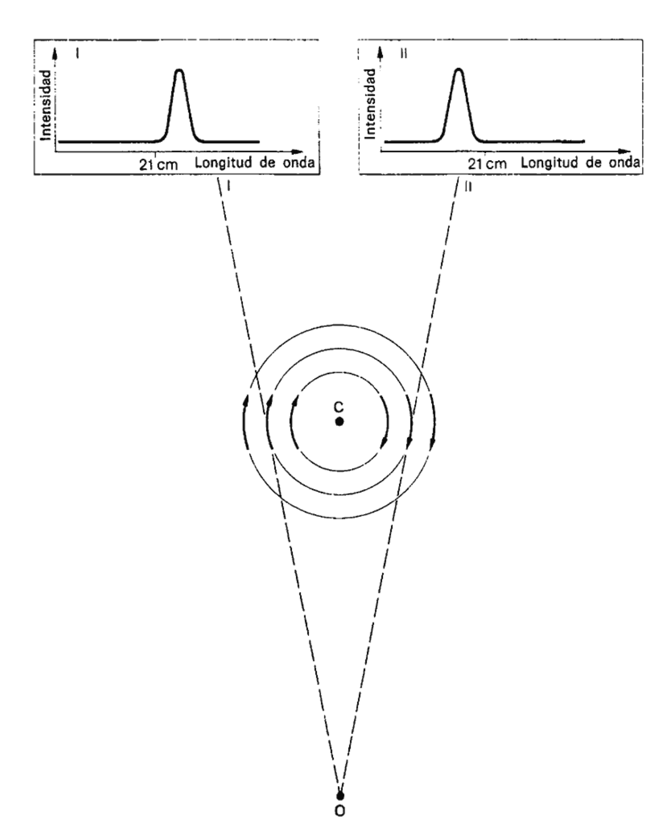


Fig. 3-7. Sistema para reconocer la rotación de las masas gaseosas en las proximidades del centro (C) de nuestra galaxia Vía Láctea. Si los gases en rotación emiten en una longitud de onda determinada, por ejemplo 21 cm, esta radiación debido al efecto Doppler parece de mayor longitud de onda al observador O en la visual I, en la que ve el gas alejarse de él (gráfica de arriba a la izquierda), en cambio en la visual II es de menor longitud de onda (gráfica de arriba a la derecha).

Pero el movimiento de rotación del gas central revela más cosas. El gas, como las estrellas, ha de obedecer la ley del equilibrio continuado entre la fuerza centrífuga del gas que gira alrededor del centro y la fuerza de atracción ejercida por las masas del centro. La rotación observada permite calcular la fuerza

centrífuga, y esto constituye un punto de partida para estimar la fuerza de atracción del centro. Este último dato proporciona cierta información sobre la cantidad de materia que hay allí acumulada. Hay con seguridad más de 300 millones de masas solares. Esta cifra resulta casi decepcionantemente pequeña, si se recuerda que el mismo anillo de las nubes moleculares contiene unos 100 millones de masas solares. Si realmente el centro expulsó las nubes moleculares de su interior, parece que se haya agotado en la empresa. ¿Recibe quizá continuamente este centro misterioso nuevo material de alguna otra parte?

IV. SONDEANDO LA VÍA LÁCTEA

La Vía Blanca.

Circulus lacteus, una figura del cielo / está más en Cancro que en Capricornio / y divide el cielo por la mitad. Tiene muchas estrellas / pero ningún número seguro / por eso le llaman la Vía Blanca del cielo.

Quien nace bajo este signo / toda la vida será pobre / enfermo y desgraciado.

REGIOMONTANUS,
Calendario de todo tipo de medicinas...
Augsburgo, 1539

Este capítulo está dedicado a la determinación de las distancias de los objetos cósmicos. Contiene muchos detalles técnicos. Son necesarios, pues para saber si el Universo en lo «hondo del cielo» tiene algún fin hay que saber primero qué significan estas profundidades cósmicas. Hay que conocer las distancias que separan las estrellas entre sí y estar enterado de los procedimientos que utilizamos para penetrar con nuestras mediciones en las profundidades cada vez más grandes del espacio.

Las estrellas del cielo se nos aparecen como puntos de luz; aunque las observemos con los mayores telescopios del mundo, las estrellas continúan siendo puntos. Se nos aparecen proyectadas sobre la esfera celeste, y sólo vemos una figura bidimensional. No podemos saber qué estrella está cerca de nosotros y cuál muy lejos. Si todas las estrellas brillaran con la misma fuerza, la vida de los astrónomos sería más fácil. El brillo de las estrellas en el cielo nos informaría sobre sus distancias. Las estrellas próximas a nosotros serían brillantes, las situadas más lejos débiles, porque el brillo que ofrece una fuente luminosa, su brillo aparente, depende de su distancia a nosotros. Una bombilla de 60 vatios a un metro de distancia da una luz agradable para la lectura, la misma bombilla en lo alto de

un campanario próximo nos parece mucho más débil y no nos sirve para leer.

La bombilla de 60 vatios cuyo brillo aparente disminuye con la distancia puede sin embargo servirnos para determinar distancias. Al interceptar su luz con un fotómetro, si la bombilla está cerca, la aguja indicadora subirá mucho, si la bombilla está lejos, bajará. Hay una regla simple: el doble de la distancia da un cuarto de desviación de la aguja, el triple una novena parte... Si indicamos en el fotómetro la desviación que corresponde a una distancia conocida, por ejemplo dos metros, podremos conocer la distancia de la bombilla correspondiente a cada indicación de la escala. El fotómetro se convierte así en un medidor de distancias. Es importante que utilicemos siempre bombillas de igual intensidad luminosa. Serán nuestra fuente normalizada de luz, que nos revelarán las distancias. Si todas las estrellas tuvieran la misma intensidad luminosa, es decir los mismos vatios, con un fotómetro muy sensible podríamos conocer sus distancias.

Pero las estrellas no nos hacen el favor de tener todas el mismo brillo y de servirnos de bombillas normalizadas en el Universo. Esto puede comprobarse inmediatamente con las estrellas dobles. En el cielo hay *pares estelares* que giran uno alrededor del otro a lo largo de los años o de los siglos, pares estelares que están estrechamente ligados por su gravedad, como por ejemplo el planeta Tierra y el Sol. Las estrellas cuyo movimiento está regido por la atracción mutua no pueden estar muy separadas, y por lo tanto las dos deben estar aproximadamente a la misma distancia de nosotros. Si fuera cierto que todas las estrellas brillan igual, las dos componentes del par deberían presentar un brillo aparente también igual, puesto que su distancia a nosotros es la misma. Sin embargo observamos muchos pares de este tipo en los que el brillo de una estrella es más de mil veces superior al de la otra. Su luminosidad debe ser por lo tanto distinta. Está pues condenado al fracaso cualquier intento de ordenar por distancias las estrellas basado en la suposición de que todas brillan igual.

La primera determinación de la distancia de una estrella fija se llevó a cabo en octubre del año 1838. El astrónomo de Konigsberg Friedrich Wilhelm Bessel pudo demostrar que una estrella de la constelación del Cisne distaba de nosotros 3.4 pc. Para ello aprovechó el hecho de que la Tierra se desplaza alrededor del Sol y de que si queremos apuntar a una estrella debemos mirar en direcciones ligeramente distintas a lo largo de las estaciones del año. Este efecto, llamado *paralaje,* es más pronunciado en las estrellas próximas que en las lejanas. Si puede medirse en una estrella, permite determinar la distancia del astro con ayuda del radio de la órbita terrestre. El paralaje, es decir el desplazamiento aparente de la estrella en el cielo, se mide en segundos de arco. Así nació la unidad de distancia parsec, que apareció ya en nuestro primer capítulo. El ángulo a medir es pequeño. Cuando Bessel determinó el primer paralaje tuvo que medir un ángulo equivalente a una diezmilésima parte del diámetro de la Luna nueva. Con este método pueden medirse distancias de hasta 100 pc, pero más allá de los 10 pc las distancias obtenidas son ya bastante inseguras, porque los paralajes son cada vez más pequeños y cada vez se acercan más al límite de los errores de medición. El método de los paralajes falla en las grandes distancias.

Este método no nos lleva muy lejos cuando las distancias deben medirse en kpc, como en la Vía Láctea, y apenas tiene ningún papel en la medición de nuestra galaxia. Con él podemos como máximo explorar los alrededores del Sol. Por este motivo no voy tampoco a tratarlo con mayor detenimiento. Solo podrá esperarse un renacimiento de los métodos de paralaje cuando esté en órbita alrededor de la Tierra el Space-telescope que se encuentra actualmente en fase de construcción (ver el apéndice C).

Si queremos sondear la Vía Láctea, y utilizar como veremos estos valores para determinar las distancias entre las galaxias, debemos utilizar otro procedimiento. Pero antes de explicarlo vamos a ver cómo se miden las velocidades de las estrellas, porque en los métodos que luego describiremos las distancias se determinan pasando primero por mediciones de velocidad.

Movimiento propio de las estrellas

Hemos visto ya que las estrellas del halo al atravesar el disco de la galaxia pasan a gran velocidad al lado de las estrellas que pueblan el disco. Es decir que las estrellas de ambas poblaciones se mueven unas en relación a otras. Pero también las mismas estrellas del disco en su movimiento de traslación alrededor del disco pueden alejarse y aproximarse unas en relación a otras (fig. 3-5). Hay además unos movimientos pequeños y desordenados que se superponen al movimiento de rotación del disco. Es decir que las estrellas del cielo no están inmóviles sino que se desplazan en relación unas a otras.

Cuando decimos que una estrella se mueve en el cielo, no nos referimos a su movimiento diario, que va de la salida al ocaso. Sabemos que este movimiento es sólo aparente, debido a que observamos el cielo desde el carrusel en rotación de la Tierra. Decimos concretamente que la estrella se mueve en relación a las demás estrellas. Las estrellas no son pues fieles a su tradicional denominación de «estrellas fijas». Sólo parecen fijas si se las observa pasajeramente, durante el corto intervalo de una vida humana.

Por desgracia no podemos coger el metro y subir al cielo para determinar si una estrella se mueve o no. Sólo podemos comprobar que en el transcurso del tiempo sus distancias angulares a las demás estrellas varían. Podemos pues medir la variación que a lo largo de un siglo experimentan los ángulos que separan una estrella de las demás (o más exactamente que la separan de estrellas tan lejanas que parecen estar prácticamente inmóviles en el cielo). Estos ángulos son muy pequeños y con frecuencia difíciles de medir. A menudo una estrella se desplaza a menos de un segundo de arco por decenio. Un segundo de arco equivale aproximadamente a dos milésimas del diámetro de la Luna llena.

Este movimiento sólo puede determinarse mediante mediciones precisas efectuadas durante largos períodos de tiempo: tan lentos aparecen los correspondientes movimientos en el cielo. Las estrellas más rápidas necesitan 1 siglo y 3/4 para recorrer un trayecto equivalente al diámetro entero de la Luna

llena. Otras necesitan más de 20.000 años para ello. Este movimiento de las estrellas se llama su *movimiento propio.* Se puede medir en muchas estrellas, y hay gruesos catálogos que contienen los movimientos propios medidos.

Los movimientos propios, por pequeños que sean, nos permiten llevar a cabo una tarea importante de observación. Nos ayudan a decidir qué estrellas tienen entre sí algún tipo de relación y qué estrellas no.

Hemos hablado ya de cúmulos estelares, de grupos de estrellas que nacieron simultáneamente en el borde interior de un brazo espiral. Pueden verse todavía hoy constituyendo los llamados *cúmulos estelares abiertos*, como las Pléyades, las Siete Cabrillas, que contienen unas 120 estrellas. A menudo se han incorporado otras estrellas al dominio de estos cúmulos estelares, estrellas que originalmente no pertenecían a él, pero que a causa del movimiento irregular superpuesto al de rotación de la Vía Láctea se encuentran ahora en medio de las estrellas del cúmulo. Además delante o detrás de los cúmulos estelares puede haber estrellas que vistas de la Tierra parecen pertenecer a estas agrupaciones. Por lo tanto, quien mira un cúmulo estelar abierto en el cielo no sabe inmediatamente qué estrella pertenece al cúmulo, qué estrella es una intrusa llegada posteriormente o bien cuál se encuentra situada por delante o por detrás de las estrellas del cúmulo.

Existe sin embargo un medio casi infalible para separar los buenos de los malos. La nube de gas a partir de la cual se formaron las estrellas del cúmulo poseía un movimiento determinado. Este movimiento se transmitió en magnitud y dirección a las estrellas que nacieron de la nube. Por lo tanto, las estrellas se mueven a través del disco casi paralelamente entre sí. Se puede descubrir que constituyen una corriente común de estrellas observando que todas muestran casi el mismo movimiento propio, mientras un intruso chocaría por su extraño movimiento.

Esto requiere una pequeña corrección. Los miembros de un cúmulo de estrellas recién formado no se mueven ni tan paralelamente ni con tanta velocidad. El nuevo cúmulo de estrellas debe participar en el movimiento de rotación de la Vía Láctea,

y puesto que en ésta las estrellas alejadas del centro recorren su órbita en un mayor espacio de tiempo que las que están cerca del centro, las estrellas de un cúmulo existente en el plano de la Vía Láctea se mueven con mayor lentitud entre sí. El cúmulo de estrellas se disuelve. Sin embargo, a pesar de haberse mezclado desde hace tiempo con las otras estrellas del disco de la Vía Láctea, puede atribuírseles un origen común. Siguen presentando el movimiento que recibieron de su nube de gas matriz. Realmente, en el cielo se encuentran entre las estrellas grupos enteros que —aunque sus miembros individuales se hallen en distintos lugares del firmamento— muestran un movimiento propio casi idéntico en magnitud y dirección. Estos grupos se denominan *corrientes de estrellas*. En lo que a su movimiento respecta se comportan como los cúmulos estelares, pero son en cierto modo cúmulos estelares sueltos, distribuidos sobre una gran zona del cielo, más impurificados por falsas velocidades de intrusos que los cúmulos estelares todavía jóvenes. Pero el movimiento propio permite separar el grano de la paja. Veremos luego que el movimiento propio común de las corrientes estelares es un medio excelente para determinar distancias en nuestra galaxia.

Los movimientos propios de las estrellas fijas del cielo son muy útiles para saber si una estrella pertenece a un cúmulo estelar o si se encuentra casualmente en la misma visual que el cúmulo, delante o detrás de él. Pero lo que podemos aprender de estos movimientos es de limitada utilidad. En primer lugar ignoramos con qué velocidad real se mueve la estrella. Sólo vemos los segundos de arco que cubre durante un siglo en el cielo. Pero esto no nos permite saber a cuántos kilómetros por segundo se desplaza el astro a través del disco galáctico, porque el movimiento propio depende de la distancia. Un tren que pasa por la estación a plena marcha delante nuestro tiene un gran movimiento propio, y tenemos que girar un gran ángulo la cabeza en poco tiempo si queremos seguir con la mirada al conductor de la locomotora. Un tren que pasa con la misma velocidad a nivel del horizonte presenta un movimiento propio reducido: podemos mirarlo durante largo tiempo sin tener que girar la cabeza de modo apreciable. Lo mismo sucede con las

estrellas. Las estrellas próximas presentan un movimiento propio superior al de otras igual de rápidas pero lejanas. Si conociéramos la distancia de las estrellas, el movimiento propio nos permitiría conocer su velocidad auténtica. Caemos de nuevo en el problema de la medición de las distancias. Pero también lo inverso es válido. Si pudiéramos conocer la auténtica velocidad, su dirección y su magnitud, podríamos calcular la distancia a partir del movimiento propio. De hecho éste es el sistema que seguiremos. Pero para ello debemos conocer primero la auténtica velocidad de las estrellas. Después veremos cómo puede descubrirse esta velocidad en algunos casos afortunados. Las corrientes estelares nos ayudan a resolver estos casos afortunados. Pero antes tenemos que estudiar un método muy distinto para la determinación de velocidades.

Las velocidades radiales

El método de los movimientos propios falla cuando una estrella se mueve exactamente hacia nosotros o se aleja exactamente de nosotros. Su situación en el cielo se mantiene entonces inalterable, la estrella no se mueve lateralmente y su movimiento no puede medirse, lo único que hace es acercarse o alejarse de nosotros. El diminuto punto que constituye la estrella en el cielo no nos permite saber si se acerca o se aleja de nosotros ni con qué velocidad lo hace. Precisamente en este caso difícil acude en nuestra ayuda el efecto Doppler descrito en el capítulo 3. El desplazamiento de las líneas de Fraunhofer del espectro de una estrella no sólo permite saber si la estrella se aproxima o se aleja de nosotros, sino que permite incluso determinar su velocidad. Los astrónomos llaman *velocidad radial* a la velocidad con que un objeto se acerca o se aleja de nosotros. Todas las estrellas que no se desplazan de modo exactamente transversal a nuestra visual presentan velocidades radiales.

Cuando los astrónomos hubieron aprendido a deducir de los espectros de las estrellas sus velocidades radiales, se dedicaron a investigar los espectros de todas las estrellas brillantes y a

confeccionar gruesos catálogos sobre el tema. En el año 1953 apareció un catálogo con 15.107 estrellas. El récord corresponde a una estrella que se nos acerca 543 kilómetros cada segundo. Hay otra que se aleja de nosotros a un ritmo de 389 km/s.

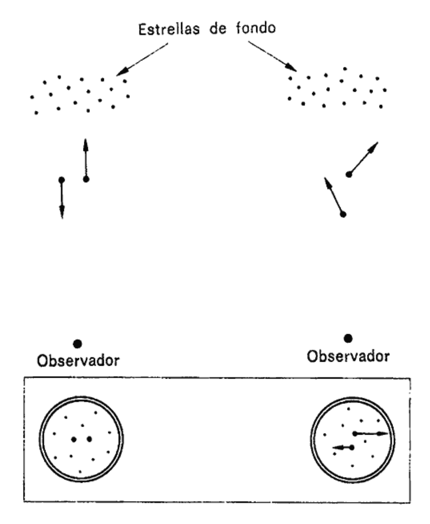


Fig. 4-1. Velocidad radial y movimiento propio: Cuando una estrella se mueve exactamente hacia nosotros, o se aleja exactamente de nosotros (izquierda), parece que esté inmóvil en el cielo (el disco de abajo a la izquierda muestra una imagen esquemática a través del telescopio). Su movimiento sólo puede descubrirse mediante el efecto Doppler de las líneas de Fraunhofer de su espectro. De este modo puede determinarse su *velocidad radial.* Si la estrella no se mueve exactamente según nuestra visual (derecha), constatamos un movimiento lateral en el cielo en relación a las estrellas de fondo que por su mayor distancia no presentan ningún movimiento lateral (imagen esquemática a través de telescopio abajo a la derecha). Medimos entonces su movimiento propio mediante el ángulo que recorre en el cielo durante un siglo. El movimiento real no suele estar exactamente ni en nuestra dirección ni en la dirección transversal a la visual, sino que está «inclinado», es una combinación de velocidad radial y movimiento propio.

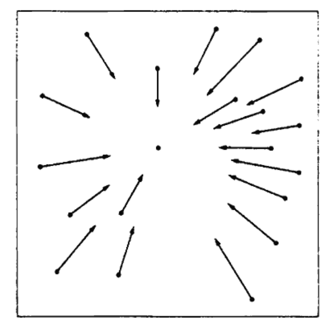
Después de lo dicho anteriormente sobre el movimiento de los cúmulos estelares, no ha de sorprendernos que los miembros de un cúmulo estelar presenten con bastante exactitud la misma velocidad radial. De este modo, si falla el método del movimiento propio, una medición de la velocidad radial puede decidir la pertenencia de una estrella a un cúmulo estelar o a una corriente estelar. El movimiento propio nos informa sobre el movimiento de una estrella *transversamente* a nuestra visual, la velocidad radial nos informa sobre su movimiento *a lo largo* de la visual (fig. 4-1).

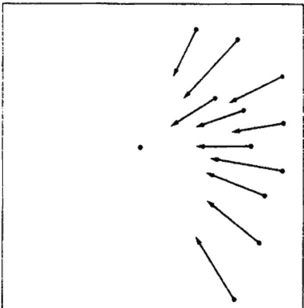
Hay otra diferencia esencial entre ambos sistemas. Supongamos que una estrella se desplaza relativamente a nosotros con una velocidad de 60 km/s en dirección transversal a la visual y de 50 km/s en la dirección de alejamiento. Si la estrella está próxima tendrá un movimiento propio relativamente grande, como vimos en el ejemplo del tren contemplado desde el andén de la estación, pero si está más lejos en el espacio su movimiento propio se reducirá. ¿Pero qué sucede con el movimiento radial? El movimiento radial se mide mediante un valor independiente de la distancia: un desplazamiento hacia el rojo que corresponde a 50 km/s. Basta únicamente que el objeto sea lo suficientemente brillante para que pueda tomarse su espectro.

Corrientes de estrellas

Podría deducirse de lo dicho que las estrellas de un cúmulo estelar se mueven en el cielo paralelamente entre sí. Esto no es totalmente cierto, no solamente porque las estrellas tienen además sus pequeñas velocidades individuales, sino por un motivo muy distinto. Supongamos que estamos con nuestro Sistema Solar en medio de un cúmulo estelar que desfila delante nuestro, pero sin que nosotros participemos en su movimiento (fig. 4-2). Supongamos que todas sus estrellas tengan la misma velocidad. Miremos ahora en la dirección de fuga de estas estrellas de movimiento paralelo. Si prolongamos nuestra observa-

ción un tiempo suficiente describirán en el cielo largas trayectorias. Y ahora interviene el efecto de las vías paralelas del tren, que parece que se unan en la distancia. Las trayectorias de las estrellas que desfilan delante nuestro presentarán el mismo efecto de perspectiva: parecerá que se dirigen a un mismo punto del cielo. Este punto caracteriza la dirección del cielo hacia la cual se dirigen todas las estrellas del cúmulo. Si estamos fuera del cúmulo estelar y sus estrellas pasan delante nuestro, también habrá un punto de dirección común, pero cuanto más lejos esté el cúmulo estelar de nosotros menos clara será la coincidencia de las direcciones de cada estrella.





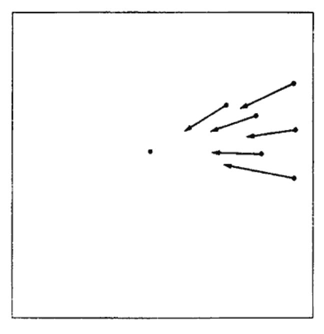


Fig. 4-2. Si estuviéramos en medio de un grupo de estrellas que pasaran por nuestro lado, las trayectorias de las estrellas se cortarían en un punto del cielo (arriba izquierda). Sucedería lo mismo si estuviéramos en el borde de la corriente (arriba derecha), y también si las estrellas del grupo pasaran por nuestro lado a una cierta distancia (abajo). Se observa exactamente este efecto en el grupo estelar de las Híades (ver la fig. 4-3).

Hay un grupo de estrellas en el cielo que muestra con bella claridad esta convergencia de las direcciones de fuga; es el cúmulo estelar de las *Híades*. Gracias a este cúmulo se ha podido crear la escala de distancias cosmológicas.

El cúmulo estelar de las Híades

Constituye un grupo extendido por el cielo que no puede cubrirse del todo con la mano extendida. Su centro está situado en la constelación de Tauro, cerca de la estrella de color rojizo Aldebarán. En la región del cielo ocupada por este grupo estelar hay otras estrellas que no tienen relación con el grupo de las Híades. La determinación del movimiento propio permite reconocerlas como intrusas. Podemos así saber siempre si cada una de las estrellas brillantes pertenece o no al grupo. El mismo Aldebarán que destaca sobre las demás estrellas no pertenece a las Híades. Las Híades muestran claramente la coincidencia de las direcciones de fuga. Todas las estrellas de las Híades apuntan a un lugar de la constelación de Orión situado al este de la roja estrella Betelgeuse (fig. 4-3).

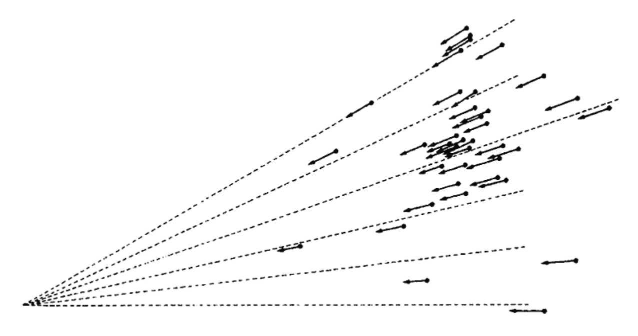


Fig. 4-3. Las estrellas del grupo de las Híades (derecha) se mueven en el cielo dirigiéndose hacia un punto de la constelación de Orión. Esto ha permitido determinar la distancia del grupo, que es de 42 pc.

Las estrellas de las Híades revelan mediante su punto de convergencia su dirección de fuga. Cojamos una estrella individual del grupo. Sabemos en qué dirección se desplaza. Conocemos además su velocidad radial. Estos datos permiten calcular su velocidad real en km/s y su dirección, como explica con más detenimiento el apéndice B. Esto nos da también la velocidad en km/s del desplazamiento de la estrella transversalmente a la visual. El movimiento propio nos dice la magnitud con que aparece en el cielo este movimiento transversal. Se obtiene así su distancia, que es de 42 pc. En principio puede obtenerse de este modo la distancia de todas las estrellas componentes del sistema de las Híades. Pero el diámetro de toda la corriente estelar es de sólo 5 pc, por lo que en primera aproximación podemos considerar que todas las estrellas están igualmente alejadas de nosotros.

Desde las Híades hacia las profundidades del espacio

Las Híades nos proporcionan estrellas situadas a una distancia de 42 pc. Esta distancia es casi nada en comparación con las dimensiones de la Vía Láctea. ¿A qué viene pues tanto ruido? Como veremos, la lucha por las distancias en el Universo es casi siempre una lucha por obtener patrones de luminosidad. Hemos conseguido con las Híades la distancia de un grupo de unas 100 estrellas de los tipos más variados. Podemos tomar sus espectros y a partir de la intensidad de las líneas de cada elemento buscar puntos comunes y clasificar las estrellas en clases. Se observa que las estrellas de la misma clase tienen casi la misma luminosidad.

Con esto tenemos casi lo que buscábamos al principio. Decíamos que la determinación de las distancias sería más sencilla si todas las estrellas brillaran con igual intensidad. Las estrellas desde luego no brillan igual, pero sí brillan igual las estrellas de clases idénticas. Si tomamos ahora el espectro de una estrella más lejana y gracias a las huellas digitales de su espectro sabemos a qué clase pertenece, deduciremos que tiene la

misma luminosidad que una estrella de las Híades con las mismas huellas digitales. Esto ha demostrado ser cierto en todos los casos que han podido comprobarse. Disponemos pues de clases de estrellas de igual luminosidad, cuyos miembros brillan como fuentes de luz. A partir de la luminosidad de la estrella de una clase y a partir de su brillo aparente podemos determinar su distancia. Las Híades nos han permitido por lo tanto penetrar un poco más en el espacio.

Las estrellas pulsantes y la escala cósmica de distancias

En la historia de la investigación del Universo ha desempeñado su papel un método completamente distinto para determinar las distancias. Parece como si la naturaleza nos hubiera hecho un regalo destinado a facilitarnos la determinación de las distancias del Universo, como si hubiese colgado una especie de letrero a un tipo especial de estrellas para que nosotros leamos la luminosidad de la estrella y podamos deducir las dimensiones del Universo a partir únicamente de estas estrellas. Sabemos en efecto que se puede determinar la distancia relacionando el brillo aparente de una estrella con su luminosidad. A pesar de ser tan útil este hecho, los astrónomos cayeron en una trampa y necesitaron decenios para salir de ella. Las estrellas a que nos referimos tienen la propiedad de que su luminosidad cambia rítmicamente a lo largo del tiempo (fig. 4-4). Hablamos de ellas en el capítulo 3. El caso empezó con el descubrimiento de una astrónomo de los EE.UU. Miss Henrietta Swan Leavitt llegó en 1902 al Observatorio de Harvard. Su dominio de investigación eran las estrellas variables. En el archivo de placas de Harvard había miles de fotografías de todas las regiones del cielo tomadas repetidamente. Si se comparan las fotografías de la misma región del cielo tomadas en épocas distintas pueden descubrirse las estrellas cuya luminosidad cambia con el tiempo, las llamadas *estrellas variables.* Cuando se descubre una estrella de este tipo y se estudia su comportamiento en todas las placas disponibles, puede describirse de qué tipo son sus variaciones, si son irregulares o periódicas.

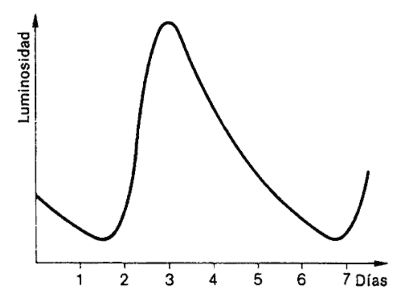


Fig. 4-4. Variación de la luminosidad de la estrella Delta Cephei. La luminosidad crece hacia arriba, el tiempo crece hacia la derecha en días. La luminosidad de la estrella aumenta y disminuye con un ritmo de 5,4 días. Las estrellas cefeidas tienen la importante propiedad de que la potencia de emisión de las estrellas de periodos más largos es mayor que la de estrellas de periodos más cortos. Hay una relación simple (fig. 4-5) que permite determinar la luminosidad a partir del periodo de una estrella cefeida. Estas estrellas constituyen pues patrones ideales de luminosidad para determinar distancias cósmicas.

El observatorio de Harvard había reunido en Perú durante muchos decenios fotografías de las dos Nubes de Magallanes. Sabemos ya que estas nubes son dos pequeñas galaxias compañeras, situadas a unos 60 kpc de distancia de la Vía Láctea, que pueden resolverse con el telescopio en estrellas individuales. Miss Leavit buscó estrellas variables en las dos nubes. En el año 1908 había descubierto un total de 1.777 estrellas variables en estos sistemas. Sólo pudo demostrar que 17 estrellas de este total, situadas en la Pequeña Nube de Magallanes, variaban de brillo con un ritmo regular. Todas eran estrellas pulsantes que se hinchan y se contraen rítmicamente, las llamadas *estrellas cefeidas*, observadas ya en las regiones más variadas de la Vía Láctea. La luz de la estrella pulsante más rápida de Miss Leavitt variaba rítmicamente con un período de 1,25 días, la más lenta necesitaba 127 días. Le sorprendió que las estrellas de período corto aparecieran como puntitos débiles, mientras que las de período más largo fueran mucho más brillantes. Existía al parecer una regla: las estrellas cefeidas de período más largo son también las más brillantes.

Hay que tener en cuenta que en este caso todas las estrellas están prácticamente a la misma distancia de nosotros, debido al enorme alejamiento de la Nube en comparación con su diámetro. Esto significa a su vez que las estrellas que aparecen más brillantes emiten realmente más luz. Si se demuestra que el período de una estrella cefeida permite determinar su luminosidad, se habrá dado un gran paso adelante. En efecto, vemos estrellas pulsantes hasta en los rincones más lejanos del disco de la Vía Láctea. Si seguimos pacientemente las variaciones de su brillo podremos calcular su período de oscilación. Si existe una relación unívoca entre el período y la luminosidad, podremos deducir esta última a partir del período, y a partir del brillo aparente deduciremos la distancia. Las estrellas cefeidas constituyen pues patrones cósmicos de luminosidad cuyo brillo en el cielo permite determinar su distancia. Son auténticos hitos del Universo.

Pero no estaba todo hecho; Miss Leavitt disponía únicamente de 17 estrellas. Cuatro años después tenía ya más material y comprobó que existía realmente una relación entre el período y la luminosidad. Cuanto mayor es el período, mayor es la luminosidad (fig. 4-5).

¿A qué distancia están los cúmulos estelares globulares?

Lo que en realidad había descubierto Miss Leavitt era una relación entre el período y el *brillo aparente.* Pero para utilizar las estrellas cefeidas en la determinación de distancias lo que se necesita es una relación del período con la *luminosidad.* Faltaba todavía determinar la distancia de una sola estrella pulsante para calibrar el conjunto. Todavía ignorábamos *qué* luminosidad tiene una estrella cuyo período sea por ejemplo de tres días. Faltaba saber para ello la distancia de la Pequeña Nube de Magallanes. No hay ninguna estrella pulsante en las proximidades del Sol accesible al método del paralaje, tampoco hay ninguna en el grupo de las Híades. Se tenía pues la maravillosa regularidad de Miss Leavitt, pero faltaba todavía el punto decisivo, la calibración. Hizo su aparición entonces,

en el momento justo, un astrónomo de veintinueve años. Harlow Shapley.

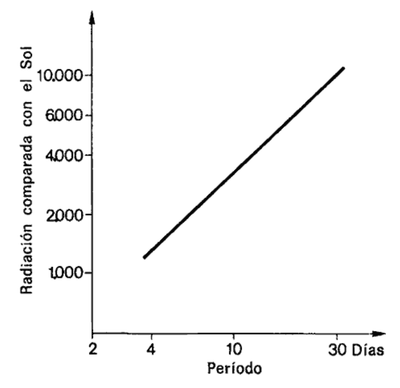


Fig. 4-5. Relación periodo-luminosidad de las estrellas cefeidas. A cada período de las variaciones de luminosidad corresponde una potencia radiada media muy concreta. El periodo puede obtenerse observando pacientemente la estrella cefeida, y el diagrama dará inmediatamente la luminosidad media de la estrella. Ésta, comparada con la luminosidad aparente, proporcionará la distancia. Un error en la calibración de esta relación dio durante decenios falsas distancias para las galaxias.

Shapley, nacido en 1885, había empezado a los 16 años como reportero de un diario de una pequeña ciudad de Kansas, luego desplazó su actividad durante poco tiempo a Missouri, donde trabajó como periodista de temas legales. En el año 1907 se fue a la universidad porque quería estudiar periodismo a fondo. Pero la escuela universitaria de periodismo abría un año después y Shapley buscó otro tema de estudio. Más tarde escribió que al hojear el programa de estudios con sus distintos departamentos observó que podía pronunciar con más facilidad «astronomy» que «archaeology». Al parecer esto le decidió, y se matriculó en astronomía. En el año 1914 le ofrecieron una plaza en el Observatorio de Monte Wilson en California, al norte de Los Ángeles, y la aceptó.

Imaginémonos la situación de aquella época. Se suponía que vivíamos en un disco plano de estrellas, pero era difícil

descubrir sus dimensiones precisas. Si se apuntaba con el telescopio hacia cualquier dirección de la Vía Láctea y se intentaba estimar hasta dónde se veían estrellas en aquella dirección, parecía que al cabo de unos pocos kpc el número de estrellas disminuyera de modo pronunciado y que se llegara así al borde del sistema. La densidad parecía disminuir igual en todas las direcciones del plano de la Vía Láctea. Esto hacía suponer que nosotros con nuestro Sol estábamos en el centro del disco y que el disco en sí tenía como máximo un diámetro de 16 kpc. Se suponía que su grosor era de 3 kpc. En esta imagen nosotros ocupábamos de nuevo una posición central. Del mismo modo que antes de Copérnico vivíamos en el centro del Sistema Solar y todo se movía alrededor nuestro, incluso el Sol, también ahora estábamos en el centro del sistema galáctico y miles de millones de estrellas trazaban sus órbitas alrededor nuestro.

Esta era la situación cuando el joven Shapley llegó a Monte Wilson. Miss Leavitt acababa entonces de mejorar la relación período-luminosidad de las estrellas cefeidas. Faltaba todavía saber la distancia de un único objeto de este grupo de estrellas variables. Esto respondía bien a los intereses del astrónomo recién llegado al Observatorio de Monte Wilson, a quien atraía el tema de los cúmulos estelares globulares. Hemos visto ya en los capítulos 1 y 3 que en el halo, fuera del disco de la Vía Láctea, hay cúmulos globulares. Aparte de ellos hay también en el halo estrellas solas. Entre las estrellas de los cúmulos globulares y entre las estrellas solas del halo se encuentran muchas estrellas variables cuyas curvas recuerdan las cefeidas. Es especialmente notable que muchas de ellas sean estrellas pulsantes con períodos inferiores a un día. Estas estrellas han recibido el nombre de *estrellas RR Lyrae* por una estrella de este tipo de la constelación de la Lira. Se conocen en el halo 4.000 estrellas de este tipo. Hay además muchas variables regulares, cuyo período es de varios días, como el de las cefeidas de Miss Leavitt en la Pequeña Nube de Magallanes. Así pues, parecía lógico relacionar el problema de las dimensiones de nuestro sistema galáctico con el tema de las estrellas del halo.

Pero la relación período-luminosidad de Miss Leavitt no era utilizable de entrada. Había que calibrarla. Shapley utilizó

para ello un método especial. Se basa en un principio que todos conocemos. Imaginemos que estamos de noche en un prado y que vemos en la distancia las farolas de una carretera. Puesto que no conocemos el país y que sólo vemos los puntos brillantes, cuyas intensidades quizá sean distintas, es difícil decidir cuáles son las lámparas próximas a nosotros y cuáles las lejanas. El problema cambia inmediatamente si vamos siguiendo las lámparas mientras andamos. Las que estén cerca de nosotros se desplazarán de modo apreciable; si nos acercamos a ellas, al principio parecerá que las tenemos delante y pronto las dejaremos atrás. En cambio las lámparas situadas a mayor distancia se desplazarán más lentamente; parecerán quietas en el horizonte. Dicho de otro modo: mientras andamos por los prados observamos un gran movimiento propio en las farolas muy próximas, y poco movimiento en las lejanas. Si escojo un grupo de quizá 20 farolas, mido su movimiento durante mi paseo y descubro que todas tienen un gran movimiento propio sabré que he escogido farolas muy próximas. Si conozco mi velocidad de avance podré determinar la distancia media a las farolas escogidas.

El mismo principio puede aplicarse a las estrellas. Shapley lo utilizó con las estrellas RR Lyrae, las estrellas pulsantes de la población del halo cuyos períodos de oscilación eran inferiores a un día y que parecían cefeidas de período corto. El Sol se desplaza por el espacio entre ellas. Presentan pues movimientos propios, a partir de los cuales Shapley pudo deducir la distancia media de estas estrellas a nosotros. A partir de esta distancia y del brillo aparente pudo calcular la intensidad real de las estrellas. Descubrió que todas brillaban aproximadamente con igual intensidad. Su luminosidad es aproximadamente cien veces la del Sol. De este modo quedaba fijado al punto cero de la famosa relación período-luminosidad de Miss Leavitt, por lo menos esto se pensó entonces. Los cúmulos estelares globulares contenían también estrellas RR Lyrae, incluso variables más brillantes de períodos mayores, por lo tanto quedaba abierto el camino para someter a una prueba más precisa la distribución espacial de los cúmulos globulares.

Shapley fue uno de los astrónomos con más ideas de su época. En ocasiones su fantasía le dominaba, y el gran astrofísico norteamericano Henry N. Russell (1877-1957) en una carta llena de elogios señalaba en 1920 que quizá convenía domar algo la riqueza imaginativa de Shapley. Es poco conocido actualmente, incluso entre los astrónomos, que Shapley en el Monte Wilson no sólo estudiaba estrellas sino también hormigas. Shapley en su vejez señalaba con satisfacción cinco publicaciones anteriores sobre este tema. Entre ellas figuraba su descubrimiento de que la velocidad de marcha de las hormigas del Monte Wilson tiene una relación sencilla con la temperatura. Pero volvamos a los cúmulos estelares globulares de Shapley. Lo que descubrió revolucionó nuestras concepciones anteriores sobre la estructura de la Vía Láctea.

Cómo Shapley nos expulsó del centro de la Vía Láctea

Shapley estaba bastante seguro de que todas las estrellas RR Lyrae emitían aproximadamente con la misma intensidad. Había un número suficiente de ellas en los cúmulos globulares y se vio entonces que los cúmulos cuyas estrellas RR Lyrae aparecían muy débiles eran también más pequeños en el cielo que otros cúmulos cuyas estrellas RR Lyrae brillaban más. Esto hizo suponer que los cúmulos que parecían más pequeños estaban más alejados de nosotros, lo cual explica que el brillo aparente de sus estrellas RR Lyrae sea también menor. Las estrellas lejanas parecen más débiles que estrellas de igual luminosidad más próximas. Quedó así abierto el camino para medir el sistema de los cúmulos estelares globulares, es decir el halo de la Vía Láctea.

Lo que primero sorprende es que en la región donde la Vía Láctea atraviesa la constelación de Sagitario, haya muchos más cúmulos globulares que en la dirección opuesta (figs. 4-6 y 4-7). Si estuviéramos con el Sol en el centro de la Vía Láctea, como se creía en aquel entonces, y si este centro de la Vía Láctea coincidiera además con el centro del halo, deberíamos ver el mismo número de cúmulos globulares en cualquier dirección

del cielo. Es seguro por lo tanto que no estamos en el centro del sistema de los cúmulos globulares. Pero Shapley consideró absurdo que la galaxia y el halo tuvieran dos centros distintos, y la única conclusión lógica era que tampoco ocupamos el centro de nuestro sistema galáctico.

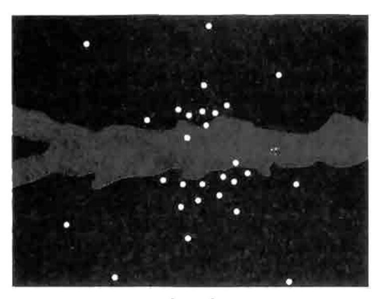


Fig. 4-6. A ambos lados de la Vía Láctea y en dirección de la constelación de Sagitario (en el centro del dibujo) se observan muchos cúmulos estelares globulares (representados esquemáticamente por puntos claros), pero en la misma Vía Láctea sólo hay unos cuantos. Esto se debe a que están muy concentrados en dirección del centro galáctico, y además a que la galaxia es opaca en las proximidades del plano central (ver la fig. 4-7).

Pero no bastaba con esto. Las estrellas RR Lyrae tienen siempre la misma luminosidad, y sirven por lo tanto de patrones de luminosidad. Los cúmulos estelares globulares contienen estrellas RR Lyrae, y Shapley pudo determinar también las distancias de los cúmulos y obtener así el diámetro del halo. Los cálculos de Shapley dieron un valor de 100 kpc. Hoy creemos que los cúmulos estelares globulares ocupan un dominio espacial esférico cuyo diámetro es de 30 kpc. La densidad con que aparecen los cúmulos en el halo disminuye hacia fuera, y cuanto más nos acercamos al centro de la Vía Láctea, más apretados están los cúmulos. En el centro de la Vía Láctea la densidad de los cúmulos globulares es especialmente elevada. La distancia de los cúmulos estelares nos permite calcular también a qué distancia estamos nosotros y el Sol del centro de la Vía Láctea. El valor aceptado hoy generalmente es de unos 10 kpc.

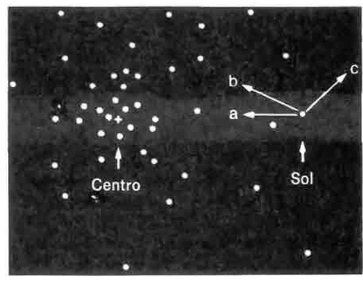


Fig. 4-7. Disco galáctico y cúmulos estelares globulares. Si miramos en la dirección a desde la posición del Sol, miramos en una dirección donde la densidad de cúmulos globulares es grande. Pero nuestra mirada no llega muy lejos debido a la absorción del polvo del plano galáctico, y no vemos un número especialmente grande de cúmulos. Al mirar en la dirección b vemos por fuera de la capa de polvo y observamos muchos cúmulos globulares. También en la dirección c miramos por fuera de la capa de polvo, pero allí los objetos son escasos, porque los cúmulos galácticos están concentrados alrededor del centro galáctico. Para ver muchos cúmulos globulares no hay que mirar en dirección del centro galáctico sino algo «de lado», de modo que nuestra mirada pase por encima de la capa de polvo. La mayoría de cúmulos globulares se ven pues cerca de los dos bordes de la banda de la Vía Láctea, en la región del centro galáctico, como está indicando en la fig. 4-6.

Los trabajos de Shapley tienen también otra consecuencia importante. En los cúmulos estelares globulares hay también muchas estrellas variables con períodos de varios días cuyas curvas de luminosidad se parecen mucho a las de las cefeidas que Miss Leavitt encontró en la Pequeña Nube de Magallanes, por lo tanto era lógico suponer, como hizo Shapley, que las estrellas del halo permitían calibrar todas las estrellas pulsantes, incluso las de la lista de Miss Leavitt. Esto resultaría ser un grave error. Pero para descubrirlo deberían transcurrir todavía 30 años.

Se había medido la Vía Láctea. Bastaba observar un cúmulo estelar globular, dondequiera que fuera, para que las estrellas variables que contenía delataran su distancia. Shapley nos había expulsado del centro de la Vía Láctea, pero también

nos había regalado un sistema galáctico más grande y mejor. Si el diámetro del halo se calcula hoy en 30 kpc, el diámetro del disco de la Vía láctea es de 25 kpc, es decir, mucho mayor de lo que se había imaginado antes de Shapley.

Cuando estalló la I Guerra Mundial se creía todavía que ocupábamos el centro de la Vía Láctea. Cuando terminó la contienda se sabía ya que esto era falso. (Aunque la verdad se hubiese conocido inmediatamente no habrían cambiado mucho las cosas.) Fue una sorpresa saber que no estamos en el centro del disco de la Vía Láctea. Se creía que la idea de estar viviendo en el ombligo de la Vía Láctea se basaba en argumentos sólidos. Al mirar en cualquier dirección del disco parece como si las estrellas llenen el espacio con densidad decreciente a medida que aumenta la distancia. Nos parece que el borde del disco está a igual distancia de nosotros en todas direcciones, como sería de esperar si estuviéramos en el centro. Pero esta conclusión es falsa, es una ilusión creada por las masas de polvo del disco galáctico que absorben la luz de las estrellas.

Tomemos un ejemplo: Supongamos que estamos en un prado. Hay niebla y nuestra mirada sólo alcanza la distancia que la niebla permite. El límite visual se encuentra pues a una distancia igual de nosotros en todas direcciones, suponiendo que la niebla esté distribuida de modo uniforme. Estamos en el centro de nuestro Universo visible. Pero no debemos deducir de ello que ocupamos también el centro del prado. Cuando la niebla se levante quizá descubramos que el prado está limitado al sur por un bosque cercano, mientras que hacia el norte se extiende un largo trecho. La niebla nos había hecho creer que estábamos en el centro. Lo mismo sucede en la Vía Láctea. En cualquier dirección en la que miremos, el velo nebuloso galáctico debilita la luz de las estrellas más lejanas. Tenemos la sensación de estar en el centro.

Por fortuna nuestra mirada no topa en todas direcciones con cortinas de polvo. Nuestra galaxia sólo es polvorienta en las proximidades de su plano central, y nuestra mirada sólo queda limitada cuando la dirigimos hacia el borde del disco. El polvo apenas nos impide ver cuando miramos fuera del disco. Shapley aprovechó este hecho, pues sus cúmulos globulares están

situados en el halo. Para verlos tenemos que levantar la mirada por encima del plano de la Vía Láctea. El polvo galáctico en este caso no nos molesta mucho.

Las estrellas de las Híades determinan las dimensiones del Universo

Todavía hoy se utilizan las estrellas pulsantes para determinar la distancia de las galaxias más próximas. Pero para fijar el punto cero de la relación período-luminosidad se sigue un camino distinto al seguido por Shapley. Lo más fácil sería que el grupo de las Híades contuviera una estrella cefeida. Por desgracia esto no es así. Pero hay otros cúmulos estelares que contienen cefeidas pulsantes. Si suponemos que en tales cúmulos estelares las estrellas (no pulsantes) con espectros iguales tienen la misma luminosidad que las estrellas correspondientes de las Híades, podremos deducir la distancia de este nuevo cúmulo estelar a partir de la distancia de las Híades comparando el brillo aparente. La distancia de las Híades se conoce gracias al método ya descrito de las corrientes estelares. También se conocerá pues la distancia del otro cúmulo estelar, y con ella la distancia de la estrella cefeida de su interior. Tenemos de este modo el punto cero de la relación período-luminosidad.

Como veremos más tarde, los métodos para determinar distancias mayores se basan en las distancias de las galaxias más próximas obtenidas con ayuda de las estrellas pulsantes. Vemos pues hasta qué punto nuestro conocimiento del Universo depende del grupo estelar de las Híades. El astrónomo que da una vuelta a las Híades da una vuelta a todo el Universo, por lo menos a nuestras ideas sobre las distancias de este Universo.

Mi explicación del camino seguido al pasar de la distancia de las Híades a la de un cúmulo estelar que contenga una estrella pulsante está muy simplificada. En realidad hay que tener en cuenta que la luz del cúmulo estelar y de las Híades puede sufrir debilitamientos distintos causados por las nubes de polvo. Además hay que recordar que el método de las corrientes estelares proporciona la distancia de las Híades dentro de

un determinado intervalo de error, y que estos errores se transmiten luego a las distancias mayores, hasta los cuerpos celestes más lejanos.

Veremos con mayor precisión en el apéndice D cómo se utilizan las Híades para ampliar hasta las profundidades del Universo la escala de distancias astronómicas. Las estrellas pulsantes que utilizó Shapley por primera vez para determinar las distancias cósmicas desempeñarán un papel importante en este cálculo.

En el siguiente capítulo continuaré hablando del papel de Shapley en la investigación del Universo, pero ahora quiero contar unas cuantas cosas más sobre la vida de este gran norteamericano.

En el año 1931 fue a la Universidad de Harvard. Durante los años treinta convirtió el Observatorio de Harvard en un lugar muy excitante, en una Meca de los jóvenes astrónomos de todo el mundo. Muchos de los sabios formados en esta escuela han hecho contribuciones esenciales a nuestro actual conocimiento del Universo. Hablaremos después de dos de ellos: Jesse Greenstein y Carl Seyfert. Antes de la II Guerra Mundial Shapley ayudó a entrar en los EE.UU. a los científicos que huían de Europa. Se atribuye a Richard Prager, un astrónomo judío huido de Berlín, la frase de que cada noche por lo menos mil científicos judíos rezaban una oración agradeciendo los esfuerzos de Harlow Shapley que los había salvado a ellos y a sus familias. Shapley participó decisivamente en la fundación de la UNESCO. Cuando se celebró en 1945 el bicentenario de la fundación de la Academia de Ciencias de Moscú, Shapley representó a la Universidad de Harvard en Moscú. Fue pues uno de los primeros norteamericanos en viajar después de la guerra a la Unión Soviética. Éste fue uno de los motivos del anatema que lanzó contra él el senador McCarthy, quien en 1950 le consideró uno de los cinco supuestos comunistas relacionados con el Departamento de Estado. Un año después Shapley fue rehabilitado. Mantuvo su actividad hasta bien entrada la vejez, dando conferencias y cursos hasta que en 1972 falleció en Boulder, en el estado federal de Colorado.

Harlow Shapley nos asignó un puesto secundario en la Vía Láctea. Nos demostró que este conjunto de miles de millones de estrellas se extiende sobre un gran espacio. Pero durante mucho tiempo Shapley no quiso creer que esta galaxia fuera solamente una isla más de las muchas que llenan el Universo.

V. EL DEBATE DE LOS UNIVERSOS ISLA

¿Qué son las nebulosas espirales? Antes de 1900 nadie lo sabía, pocos lo sabían en el año 1920, después de 1924 lo sabían ya todos los astrónomos.

ALLAN SANDAGE
en el prólogo de *Atlas Hubble de galaxias*

El cuadro que había forjado de nuestro sistema galáctico Harlow Shapley a fines de la I Guerra Mundial se continúa considerando correcto hoy en día, aunque debieron aplicársele algunas correcciones, relacionadas principalmente con el debilitamiento de la luz de las estrellas lejanas debido a las masas de polvo. Pero desde el punto de vista cualitativo Shapley estuvo en lo cierto. El centro del halo y el centro del disco son una sola cosa. Pero nosotros y nuestro Sistema Solar no estamos en el centro alrededor del cual todo gira. Estamos, eso sí, en el disco, pero a unos 10 kpc del centro, casi fuera de casa y delante de la puerta. El disco en sí no está lleno únicamente de estrellas. Las masas de polvo que contiene debilitan la luz de las estrellas lejanas del disco y parece que las alejen. Crean la ilusión de que a partir de una determinada distancia el espacio está casi vacío. De hecho debilitan de tal modo la luz de las estrellas lejanas que estas estrellas escapan a nuestra observación.

Hemos ido conociendo mientras tanto el pintoresco conjunto de objetos cósmicos que pueblan el disco y el halo. Hay estrellas jóvenes al lado de otras que al parecer han llegado ya al final de su vida. Se encuentran restos de explosiones de supernovas, y puede observarse la formación actual de estrellas a partir de nubes de gas y de polvo. Muchas estrellas están emparejadas, obligadas por su atracción mutua a girar para siempre una alrededor de la otra. Se ven las innumerables estrellas variables que no emiten luz de modo uniforme sino que lo hacen según las ocasiones con mayor o menor fuerza. Nuestra galaxia Vía Láctea, con sus 100.000 millones de estrellas, es

un Universo múltiple, que todavía no hemos comprendido completamente en todas sus manifestaciones. Además no es en absoluto el único, sino que hay muchos semejantes.

El enigma de las manchas nebulares

Basta encontrar el punto correcto del cielo y en una noche clara y sin Luna puede verse a simple vista en la constelación de Andrómeda una nubecilla pequeña y alargada. Los prismáticos permiten observarla con más claridad. Aunque puede verse sin medios auxiliares, parece ser que en la antigüedad nadie le prestó atención. Un astrónomo árabe. As Sufi (903-986), conocido por su catálogo estelar, la cita de pasada, pero después de él no se le prestó más atención y al final su existencia cayó en el olvido. Simon Marius de Gunzenhausen, astrónomo de corte de Ansbach, Franconia, la descubrió de nuevo en 1612 (fig. 1-1). En los cien años que siguieron se aplicó cada vez más el telescopio a la astronomía, y se descubrieron nuevas manchas nebulosas en el cielo. Fue el joven Kant quien en 1755 dio la primera explicación de aquellas nebulosidades a veces circulares, pero más generalmente elípticas. Se sabía ya entonces que la banda de la Vía Láctea puede explicarse suponiendo que estamos situados dentro de un sistema plano de estrellas, aunque se ignoraba cuál podía ser su diámetro. Kant dijo que los pequeños discos nebulosos elípticos y circulares del cielo eran también sistemas galácticos parecidos al nuestro, y en su Historia Natural del Cielo escribió: «...cuando se mira un tal Universo de estrellas fijas desde una distancia tan inmensa al ojo del observador, situado fuera de él, aparecerá bajo un ángulo pequeño, como un pequeño espacio iluminado con poca luz, cuya figura será circular si se ofrece perpendicularmente al ojo y elíptica si se mira de lado.»

Mientras Kant, que tenía treinta y un años, escribía estas líneas en Konigsberg, un joven de diecisiete años se preparaba en Hannover para viajar a Londres e ingresar como oboe en la guardia real: era Friedrich Wilhelm Herschel. Al cabo de un año volvió a casa, pero en 1757 viajó de nuevo a Inglaterra y

allí se quedó. Al principio dio clases de música, luego consiguió una plaza de organista, primero en Halifax y después en Bath. El estudio de la teoría musical le llevó a las matemáticas, y de allí le faltaba dar sólo un pequeño paso para entrar en la óptica. Empezó a interesarse por los telescopios reflectores y fabricó su propio espejo telescópico. Cuando tenía 36 años decidió ser astrónomo.

Los telescopios que él construyó se vendieron pronto en todo el mundo. En 1781 descubrió el planeta Urano. ¡O sea que nuestra patria cósmica no se acababa con Saturno! Sus telescopios se hicieron mejores y mayores. Al final Herschel, cuando se había trasladado ya a Slough, tuvo el mayor telescopio del mundo. Un tubo de 122 cm de diámetro y 12 m de longitud contenía el espejo telescópico. El tubo colgaba de una estructura de madera. Herschel exploró con este telescopio sistemáticamente el cielo buscando manchas nebulosas. En 1864 John Herschel publicó 42 años después de la muerte de su padre una lista con 5.097 nebulosas de este tipo, parte de ellas descubiertas por su padre y otras descubiertas por él mismo a lo largo de decenios. ¿Eran todas sistemas galácticos como había sospechado Kant? Hoy sabemos que el catálogo de Herschel contenía todos los objetos nebulosos que pudo descubrir con su telescopio. Además de galaxias «auténticas», había también nebulosas gaseosas situadas espacialmente cerca de nuestro Sistema Solar, es decir cuerpos que por sí mismos ofrecen un aspecto nebuloso. El catálogo contenía además cúmulos estelares globulares, que el telescopio de Herschel no pudo resolver en estrellas individuales, y que él por lo tanto consideró manchas nebulosas. Herschel no estaba muy seguro de lo que eran realmente aquellas manchas nebulosas que él descubría en el cielo. Al principio creyó que casi todas estaban formadas por estrellas, pero que su colección contenía también algunas nebulosas gaseosas cercanas. Hacia 1790 empezó a dudar de que estuviera contemplando sistemas estelares.

A pesar de ello, en el siglo pasado la tesis indemostrada de Kant gozó de buena aceptación. Tengo delante un libro con el título de *Lecciones populares sobre la ciencia de las estrellas. Dadas en Nuremberg en los inviernos de 1841* y *de 1842 por*

el Dr. Lorenz Wöckel, profesor de matemáticas del gimnasio real y *profesor de física de la escuela de oficios de Nuremberg.* La tesis está expuesta aquí de modo claro y conciso, y al autor no le atormentan las dudas. «Y así vemos el espacio infinito lleno en todas direcciones de innumerables sistemas galácticos, cada uno de los cuales está formado por millones de sistemas solares, y no encontramos ninguna frontera a nuestras mediciones y a nuestras enumeraciones.» Pero el profesor del gimnasio real de Nuremberg no podía demostrar su afirmación.

En el año 1850 apareció el tercer volumen de la obra *Kosmos* de Alexander von Humboldt, el tomo dedicado a la astronomía de la obra llamada por Humboldt: «Intento de una descripción física del Universo.» También Humboldt se plantea saber si las nebulosas elípticas son nubes de gas o formaciones semejantes a nuestra Vía Láctea. En esta discusión da un nuevo nombre a las nebulosas elípticas semejantes a la nebulosa de Andrómeda, que en su opinión podía ser un conjunto de estrellas. Habla de posibles «*Universos islas,* a uno de los cuales pertenecemos nosotros». Aquí aparece por primera vez la palabra que todavía hoy en día utilizamos a menudo cuando hablamos de galaxias llenas de estrellas que flotan a grandes distancias unas de otras en un espacio casi vacío.

La palabra está allí, pero quedó sin respuesta como antes la cuestión de saber si las manchas nebulosas de aspecto elíptico estaban formadas realmente por Universos islas, es decir, por estrellas alrededor de las cuales giraban quizás otros planetas. Nadie consiguió por ejemplo resolver en estrellas individuales con un telescopio la nebulosa de Andrómeda y confirmar así la hipótesis de los Universos islas. Mientras el músico y compositor William Herschel pasaba en Slough una noche tras otra de pie ante la montura de madera de su telescopio y dictaba sus observaciones de las manchas nebulosas que pasaban ante él por el cielo a su hermana Karoline, que le acompañaba como cantante de oratorio en sus conciertos, el mundo musical de Londres seguía todavía bajo la influencia de la obra de Haendel y de Bach. William Herschel no podía decir qué eran las manchas débiles catalogadas por él en el cielo estrellado. Tuvo que

transcurrir mucho tiempo para ello, y cuando finalmente se supo ya corría el charlestón por el mundo.

El tema de la naturaleza de las nebulosas que aparecían reunidas a miles en los catálogos tomó un nuevo giro cuando en la segunda mitad del siglo XIX se tomaron fotografías de los objetos y se empezaron a estudiar los espectros de los astros. Pronto se supo que muchos de los objetos nebulosos eran cúmulos estelares y que muchos otros son nebulosas gaseosas brillantes.

Los espectros de los cúmulos estelares se parecían a los espectros de las estrellas, con sus líneas de Fraunhofer; y los mismos cúmulos pudieron resolverse en estrellas individuales con telescopios cada vez más perfectos. En cambio las nebulosas gaseosas mostraban un espectro con líneas de emisión (fig. 2-5), muy distinto de los espectros estelares cuyas líneas son de absorción.

Quedaban sin embargo las manchas de aspecto elíptico, muchas de las cuales mostraban una estructura espiral que podía reconocerse mucho mejor en las placas fotográficas que visualmente en los telescopios. Estas nebulosas no podían resolverse en agrupaciones de estrellas, pero presentaban un aspecto que recordaba el de las estrellas, no al de las nebulosas gaseosas. ¿Podía ser cierta la idea de Kant de que las nebulosas espirales eran Vías Lácteas lejanas?

A fines de la I Guerra Mundial quedó explicada la naturaleza de nuestro sistema galáctico gracias a los trabajos pioneros de Harlow Shapley. Los cúmulos estelares globulares y las estrellas pulsantes habían servido de hitos cósmicos y la «agrimensura» galáctica había llegado a un cierto resultado. Estrellas, nubes de gas, velos de polvo, nebulosas gaseosas brillantes y cúmulos estelares constituyen el sistema plano del disco. Todo el conjunto está incrustado en el enjambre de los cúmulos estelares globulares, que si primero se habían catalogado en el mismo saco que las nebulosas espirales y las nebulosas gaseosas, al final se habían reconocido como centenares de miles de estrellas individuales.

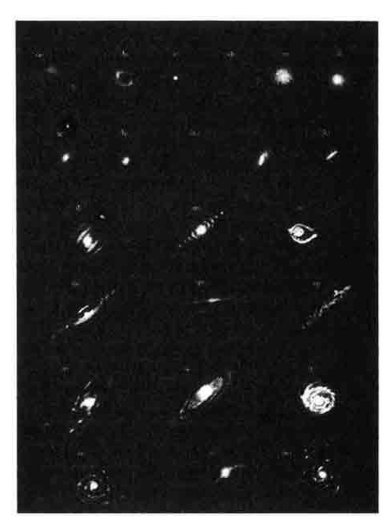


Fig. 5-1. Dibujos de manchas nebulosas realizados en el año 1908 por el astrónomo de Heidelberg Max Wolf (1863-1932), a fin de clasificar las distintas nebulosas. En el dibujo de Wolf las nebulosas gaseosas y las galaxias todavía conviven pacíficamente. Hubble se basó en este trabajo para su doctorado de Chicago (1917). La clasificación posterior de Hubble (fig. 9-4) ya sólo contiene galaxias.

¿Pero qué eran las nebulosas espirales? ¿Eran Universos islas, comparables con nuestra Vía Láctea, como se había sospechado de modo intermitente desde Kant? Hasta la época de Shapley, es decir durante los últimos 200 años, no había sido posible demostrar la tesis de Kant, ni siquiera apoyarla con un mínimo de sustancia nueva. Desde los días de William Herschel se habían construido telescopios cada vez más potentes, pero las nebulosas espirales continuaban apareciendo como formaciones nebulosas. En el año 1908 el astrónomo de Heildelberg Max Wolf preparó una serie de dibujos para clasificar las nebulosas del cielo (fig. 5-1). En sus dibujos convivían pacíficamente nebulosas gaseosas y nebulosas espirales. Wolf no estableció ninguna distinción entre los dos tipos de nebulo-

sas. Incluso al año siguiente, cuando se puso en funcionamiento un nuevo telescopio reflector en el Monte Wilson con un diámetro de 152 cm, parecía no haber cambiado nada.

Brillan estrellas nuevas en las nebulosas

Sin embargo, la verdad estaba al alcance de la mano, concretamente la demostración de que las nebulosas espirales estaban formadas por estrellas. El 31 de agosto de 1885 el observador del Observatorio de Dorpat, Ernst Hartwig, quien más tarde sería el primer director del Observatorio de Bamberg, observó con su telescopio una nueva estrella, cerca del centro de la nebulosa de Andrómeda. Era tan brillante que casi hubiera podido verse a simple vista. Esta estrella no estaba antes allí. En las semanas siguientes su brillo disminuyó y pronto se confundió totalmente con la luz difusa de la nubecilla de Andrómeda. ¿Constituía esto una demostración de que en la nebulosa había estrellas, una de las cuales había pasado de momento a primer plano superando enormemente en luminosidad durante breve tiempo a sus compañeras? Este fenómeno ya era conocido en nuestra Vía Láctea. A veces también entre nosotros una estrella se ponía a brillar de repente para luego desaparecer. (Recordemos el sueño del señor Meyer del capítulo 3.) Pudo observarse un fenómeno de este tipo realmente impresionante en la noche del 29 de agosto de 1975. Se vio a simple vista en la constelación del Cisne una estrella que no le pertenecía, una nova. Pero volvamos a la nueva estrella de la nebulosa de Andrómeda.

¿Constituía la nova una demostración de que la nebulosa estaba formada por estrellas? En principio también sería imaginable que se tratara de un fenómeno de nuestro propio sistema galáctico: que una nova se hubiera puesto a brillar en nuestro sistema, pero situada casualmente delante de un lugar ocupado desde nuestro punto de vista por la nebulosa de Andrómeda. Al principio parecía que la nova de la nebulosa de Andrómeda fuera un caso aislado, pero luego, diez años después, empezó a brillar una estrella en una nebulosa espiral de

la constelación del Centauro. La descubrió Miss Williamine P. Fleming (1857-1911), una astrónoma del Observatorio de Harvard. Era bastante improbable que en un intervalo de diez años se pusieran a brillar dos estrellas dentro de nuestra Vía Láctea y que las dos estuvieran situadas exactamente delante de una nebulosa espiral.

En el año 1917 hubo más movimiento en este terreno. El espejo de 1,5 m de Monte Wilson trabajaba con éxito desde hacía ya ocho años, y su constructor, George Ritchey, observaba con él. Descubrió entonces una nova en la nebulosa espiral NGC 6946. La designación indica que se trata del objeto número 6946 de un famoso catálogo de nebulosas, el New General Catalogue (NGC), publicado en 1888 por el director del Observatorio de Armagh, procedente de Copenhague, John Dreyer (1852-1926). Era una estrellita muy débil la que se alumbró en NGC 6946, pero reforzó las sospechas de que las nebulosas espirales están compuestas por estrellas que no pueden verse individualmente, hasta que una de ellas se pone a brillar y se hace reconocer como estrella. Ritchey buscó inmediatamente en el catálogo todas las fotografías anteriores tomadas con el telescopio de 1,5 m y descubrió que en el año 1909, sin que nadie se hubiese enterado, habían aparecido pasajeramente dos novas en la nebulosa de Andrómeda. Cuando se supo esto todo el mundo buscó en los archivos de placas y se descubrieron más novas en las nebulosas espirales.

En aquel entonces no podía saberse todavía que hay dos procesos totalmente distintos que hacen brillar en el cielo una nueva estrella. Dos procesos que no tienen nada que ver el uno con el otro. Nosotros los vimos en el sueño del capítulo 3, cuando el señor Meyer contempló la Vía Láctea en tiempo acelerado: novas frecuentes y supernovas mucho más raras, pero también de mucha mayor energía: de hecho una supernova en el máximo de su explosión es unas diez mil veces más brillante que una nova. Ernst Hartwig y Williamine Fleming habían visto explotar supernovas en las nebulosas espirales; lo que descubrió luego Ritchey eran fenómenos normales del tipo nova. Pero en ambos casos se habían puesto a brillar *estrellas*,

lo cual demostraba que la nebulosa de la constelación de Andrómeda está formada por estrellas.

Gránulos en la nebulosa de Andrómeda

La resolución del enigma de las nebulosas espirales está estrechamente relacionada con el desarrollo del telescopio. El siguiente paso en la revelación del secreto de las nebulosas espirales fue posible gracias a una hazaña técnica: la construcción del telescopio de 2,5 m de Monte Wilson.

Quizá pueda parecer a una persona no especialista que una vez descubierto el principio del telescopio, del telescopio refractor con lentes o del reflector con espejos, la construcción de telescopios se convirtió en una tarea rutinaria. Los telescopios mayores serían sin duda más caros, pero el aumento del diámetro del telescopio no debería plantear nuevas dificultades de principio. Esto es del todo falso. Cojamos el caso de un telescopio reflector. El espejo, el corazón del instrumento, se suele construir de cristal o de un material vítreo. Su peso aumenta rápidamente al aumentar el diámetro. En cada posición del telescopio su peso propio actúa en una dirección distinta y comprime y estira el cuerpo del espejo y con él la superficie reflectora. Hay que compensar estas deformaciones con fuerzas contrapuestas. Cuanto más pesado es el espejo más difícil es que todo el telescopio pueda seguir con precisión el movimiento de las estrellas. Sólo si el telescopio sigue con precisión el movimiento aparente de la estrella causado por la rotación de la Tierra podrá conseguirse una placa fotográfica de exposición prolongada en la que las estrellas aparezcan como puntos bien definidos. Pero no sólo el peso propio del telescopio empeora las propiedades reproductoras de un espejo, también el mismo espejo resulta más difícil de construir cuanto mayor es, y con más facilidad se deforma por un calentamiento irregular.

En el año 1919 se puso en funcionamiento en el Monte Wilson el telescopio mayor del mundo en aquel entonces, el espejo Hooker, llamado así por el hombre de negocios de Los Ángeles

que había financiado la empresa. Antes incluso de que se hubiera puesto en marcha aquel espejo de 1,5 m se habían iniciado en 1906 los preparativos para construir un espejo de 2,5 m. Once años después estaba ya a punto. El espejo se había fundido en Francia, y su superficie se cortó y pulió bajo la dirección de Ritchey en un trabajo de cinco años.

Poco después de haberse iniciado la utilización científica del espejo de 2,5 m en el Monte Wilson, llegó al observatorio un astrónomo de treinta años; Edwin Powell Hubble (1889-1953). Procedía del estado federal de Missouri. La familia —su padre era abogado de una empresa aseguradora— se trasladó después a Chicago. Allí Hubble fue a la escuela y después a la universidad, donde estudió física, matemáticas y astronomía. Era un joven deportivo, que medía 188 cm de altura y que tuvo éxito como boxeador de pesos pesados. Debió de ser buen boxeador, porque su manager intentó convencerle para que luchara contra el campeón del mundo Jack Johnson. En lugar de esto Hubble cogió una beca de la Universidad de Oxford para estudiar matemáticas en Inglaterra. Pero allí cambió de planes y estudió derecho. Durante este tiempo realizó un combate de exhibición contra el campeón francés de los pesos pesados Carpentier. Después de pasar con éxito los exámenes volvió a su patria y abrió en Louisville, Kentucky, un despacho de abogado. Pero al cabo de un año renunció a las leyes y volvió de nuevo a Chicago para estudiar astronomía en el Observatorio de Yerkes. Se doctoró allí en 1917, y poco después el director del Observatorio del Monte Wilson le ofreció un puesto. Mientras, EE.UU. había entrado en la guerra y Hubble se enroló en la infantería. Se trasladó a Francia con el cuerpo expedicionario y después de la guerra se quedó hasta otoño de 1919 con las tropas de ocupación norteamericanas en Alemania. Luego volvió a EE.UU. y con sus treinta años cogió el puesto que le habían ofrecido y que continuaba vacante en Monte Wilson. Estuvo allí dos años antes de que se pusiera a prueba el telescopio de 2,5 m.

La fábrica en Francia donde se había fundido el núcleo de vidrio había quedado totalmente destruida a causa de la guerra, pero el telescopio estaba a punto y se habían realizado ya todas

las pruebas y trabajos previos necesarios. El instrumento podía ya ponerse en funcionamiento. El nuevo colaborador del observatorio iba a responder pronto con el instrumento a una de las cuestiones más importantes de la astronomía contemporánea. Con el telescopio de 1,5 m se había descubierto una estructura granulosa en las espirales más exteriores de la nebulosa de Andrómeda. ¿Tenían que considerarse estrellas aquellos granos? Los primeros observadores no consideraron que fueran estrellas, pues parecían poco definidos para ser estrellas auténticas. El astrónomo sueco Knut Lundmark, que en 1921 trabajó invitado en California, se planteó la posibilidad y se preguntó qué pasaría si los gránulos de la nebulosa de Andrómeda fueran realmente estrellas, como las de nuestra Vía Láctea. Habría que deducir entonces una distancia de 300 kpc. Pero en aquel momento nadie se tomó esta idea en serio. Shapley había escrito ya en 1919: «Los gránulos de las nebulosas espirales aparecen tan nebulosos, aparte de una o dos excepciones posibles, que no pueden considerarse estrellas individuales. Quizás estos objetos nebulosos tengan relación con cúmulos estelares muy alejados.» Pero tampoco esto le parecía plausible. Shapley se convirtió en adversario de la hipótesis de los Universos islas.

Su defensor estaba a un día de viaje al norte de Monte Wilson, en el Monte Hamilton, concretamente en el Observatorio Lick. Heber Doust Curtis (1872-1942) trabajaba allí con el telescopio reflector Crossley de 91 cm estudiando nebulosas espirales. Se había iniciado en la astronomía a los 28 años, pues antes enseñaba lenguas antiguas. Le preocupaba ahora el tema de la naturaleza de las nebulosas espirales, y se dedicaba en aquel momento a las novas que aparecían en las nebulosas. Se habían visto brillar mientras tanto nuevas novas en las nebulosas espirales. El problema era que en la colección también había dos supernovas, la de Hartwig de 1885 y la de Miss Fleming de 1895. Todavía no se sabía que las estrellas de Hartwig y de Heming eran algo especial. Si se prescindía de estas dos excepciones y se consideraba que las demás novas tenían igual luminosidad que las novas que aparecían cada año en nuestra Vía Láctea, la nebulosa de Andrómeda tenía que estar a 300 kpc de

distancia. Curtis consideraba que éste era un argumento convincente en favor de la hipótesis de los Universos islas. Shapley contraatacó con la nova de Andrómeda vista por Hartwig, que comparada con las novas normales de la Vía Láctea era demasiado brillante si tenía que estar situada a una distancia tan increíble (Shapley no podía saber que la estrella era en realidad mucho más luminosa todavía). Shapley tenía todavía en la manga otra carta aparentemente mortal para la hipótesis de los Universos islas: las mediciones de van Maanen.

Adrian van Maanen era un apreciado observador de Monte Wilson que había estado tomando fotografías desde hacía más de una década de la nebulosa espiral M33 en la constelación del Triángulo para descubrir sus movimientos propios. El astrónomo descubrió cambios en los nudos brillantes de los brazos de esta bella nebulosa espiral, que nosotros miramos casi perpendicularmente desde arriba. Parecía como si las espirales giraran alrededor del centro; ¡la nebulosa presentaba el aspecto de una rueda giratoria! Había nudos en los brazos que se desplazaban en el cielo una décima de segundo en cinco años. A partir del desplazamiento angular puede obtenerse la velocidad real si se conoce la distancia. Si M33 estuviera situada en el espacio a tanta distancia como situaba la escuela de Curtis a las nebulosas espirales, es decir a centenares de kpc, la observación de van Maanen sólo podía explicarse suponiendo que los brazos espirales llevaban a cabo su movimiento alrededor del centro con una velocidad próxima a la de la luz. Esto era muy improbable. Nuestro propio sistema galáctico se mueve mil veces más lentamente. ¿No son pues las nebulosas espirales Universos islas?

El 26 de abril de 1920

Aquel día celebró la Academia de las Ciencias norteamericana (National Academy of Science) su congreso anual en Washington D.C., en los salones de la honorable Smithsonian Institution. Habían recomendado al secretario dos temas a escoger para la sesión inaugural: la nueva teoría de la relatividad

general de Einstein y la hipótesis de los Universos islas. El secretario no quiso elegir la teoría de la relatividad porque temía que fuera de comprensión difícil para los miembros de la Academia, que procedían de todos los dominios de la ciencia. Tampoco le parecía que la teoría de los Universos islas fuera muy excitante, pero al final fueron invitados Shapley del Monte Wilson, y Curtís, nombrado director del Observatorio Allegheny, de Pittsburgh. Pennsylvania. Al principio hubo algunas diferencias sobre el tema. Shapley quería hablar de la Vía Láctea. Curtis quería hablar principalmente de las nebulosas espirales, pero al final se llegó a un acuerdo. Se produjo así uno de los famosos debates sobre el tema de las dimensiones de la Vía Láctea y de la naturaleza de las nebulosas espirales. «Puede decirse», escribieron más tarde los comentaristas, «que aquel acontecimiento fue como tener Copérnico y Tolomeo discutiendo uno con otro». Curtis afirmó en resumen que el Universo no contenía un solo sistema galáctico, sino muchos; tantos como nebulosas espirales había. En cambio, Shapley, que nos había alejado del centro de la Vía Láctea, y nos había asignado un lugar secundario en ella, creía que la Vía Láctea en su conjunto era algo así como el ombligo del mundo.

Allan Sandage, uno de los grandes especialistas en galaxias de nuestra época, describió así este debate que finalizó inicialmente en tablas: «Los argumentos en favor y en contra presentados entre 1917 y 1921 constituyen un estudio psicológico muy interesante. La mejor manera de entenderlos es decir que Shapley había utilizado muchos argumentos correctos, pero que había llegado a un resultado falso. Curtis, que en este caso seguía la pista mejor, utilizaba argumentos débiles, en ocasiones incluso falsos, y sin embargo llegó a la conclusión correcta.»

Shapley finalizó su disertación con las siguientes palabras; «Me parece que nuestros ojos... contradicen la idea de que las nebulosas espirales sean sistemas galácticos llenos de estrellas, comparables a los nuestros. En realidad, no existe hasta ahora ningún motivo para cambiar la hipótesis corriente según la cual las nebulosas espirales no están formadas por estrellas, sino que son auténticas nebulosas.» Reforzó todavía esta afirmación

con nuevos resultados que parecían sostener su opinión. Entre ellos estaba también la medición por van Maanen de la rotación de la nebulosa espiral M101 (fig. 1-2) debida a movimientos propios; sus espirales deberían girar con una velocidad próxima a la de la luz si estaban situadas tan lejos como decía la hipótesis contraria. Curtis finalizó así su conferencia: «Continúo pues creyendo que... las nebulosas espirales no son objetos del interior de la Vía Láctea, sino Universos islas como nuestra propia Vía Láctea, y que estos sistemas galácticos situados fuera del nuestro indican la existencia de un Universo mayor, en el cual nuestra mirada alcanza a distancias desde diez millones de años luz (3 Mpc) hasta cien millones de años luz (30 Mpc).»

Ninguno de los dos había convencido al otro. La decisión definitiva correspondió al Monte Wilson. El proceso empezó con el descubrimiento de estrellas variables en las nebulosas espirales. Primero John C. Duncan observó algunas en una nebulosa del Triángulo, mientras buscaba novas. Luego aparecieron más. Después Hubble investigó la nebulosa de Andrómeda. Encontró de entrada dos novas. Pronto comprobó que una tercera estrella de brillo variable era una cefeida. Su período era de un mes. El cuaderno de observaciones de Hubble, donde anotaba todas las placas fotográficas que sacaba, contiene una nota marginal escrita en propia mano y referida a la placa H335H. La foto era de la nebulosa de Andrómeda (M31) tomada el 5 de octubre de 1923 con una exposición de 45 minutos. Hubble escribió: «En esta placa... se han encontrado tres estrellas, dos de ellas novas, y otra variable, que más tarde se ha identificado como cefeida, la primera encontrada en M31.» Hubble determinó inmediatamente su período, consultó la relación período-luminosidad de Shapley y obtuvo la distancia: 300 kpc (Hubble no sabía todavía que esta relación contiene un error, y que según creemos hoy es más correcta una distancia doble). Era pues evidente que la nebulosa de Andrómeda estaba situada muy lejos del disco de la Vía Láctea, más lejos incluso que el dominio del halo, cuyo diámetro es de 30 kpc. La discusión había finalizado. La noticia se dio a conocer en diciembre de 1924 en una sesión de la Sociedad Astronómica

de América. Hubble no asistió a ella, pero había preparado un manuscrito que se leyó allí. Mientras tanto había descubierto 36 cefeidas en nebulosas espirales. Todas confirmaban la teoría de los Universos islas. Entre los oyentes estaban también Shapley y Curtis. Al parecer intercambiaron luego algunas palabras, que por desgracia no se han conservado para la posteridad. El comunicado de Hubble no fue ya ninguna sorpresa para Shapley. El mismo Hubble le había escrito el 19 de febrero de 1924: «Te interesará saber que he encontrado una cefeida en la nebulosa de Andrómeda.» Shapley sabía ya que la hipótesis de los Universos islas que él había combatido estaba confirmada, y que acababa de derrotarle la relación período-luminosidad que él mismo había calibrado A partir de entonces se dedicó cada vez más al estudio de los «Universos islas».

¿En qué quedaba ahora el movimiento de rotación de las nebulosas espirales M33 y M101 medido por van Maanen? ¿Tenían que girar estos Universos islas con una velocidad próxima a la de la luz, puesto que se había comprobado la gran distancia a que estaban situadas las nebulosas espirales? No, porque en el curso de los decenios su movimiento debería haberse podido medir cada vez con mayor facilidad, pues se dispondría de fotografías tomadas a intervalos temporales cada vez mayores. Pero nadie observó de nuevo movimientos propios en ésta o en otras galaxias. Era evidente que las mediciones de van Maanen eran erróneas.

Pido un poco de paciencia al lector si me detengo un momento en este tema. Adrian van Maanen (1884-1946) procedía de una vieja familia holandesa. Se doctoró en 1911 en Utrecht, y un año después se colocó en Monte Wilson de California, donde permaneció hasta su muerte. Era un especialista en mediciones de paralaje (ver el apéndice C) y en la determinación de los movimientos propios de las estrellas (ver la pág. 95). Además contribuyó esencialmente a la medición de los campos magnéticos del Sol. Por lo tanto, la medición de los movimientos propios de los nudos brillantes de algunas nebulosas espirales (en aquel entonces todavía no podían resolverse las nebulosas en estrellas individuales) entraba de lleno en la línea de

sus trabajos. Como ya he dicho, sus mediciones fueron erróneas, pero debo añadir que hasta ahora no se ha aclarado completamente en qué consistió su error, y de ello deduzco que no actuó a la ligera en este tema. Sin duda no vio algún efecto del material utilizado que falsificaba sistemáticamente sus mediciones. Sucede a menudo que los científicos cometen errores. Pero el hecho de que el error de van Maanen se cite continuamente hoy en día en las obras y manuales de consulta se debe a la valoración que reciben actualmente los logros científicos.

En un resultado de la investigación se aprecia sobre todo el logro intelectual. Pero también se da una significación especial al campo al cual pertenece el resultado. Es un ejemplo de ello la supernova que Ernst Hartwig descubrió en la nebulosa de Andrómeda (ver la pág. 126). Hartwig, además de realizar muchos trabajos importantes contribuyó de modo decisivo a la comprensión de un tipo especial de estrellas variables, las llamadas variables de ocultación. Muy pocos astrónomos lo saben hoy en día, aunque utilicemos continua e inconscientemente su idea. Sin embargo, figura en todos los libros de historia de la astrofísica moderna el hecho de que Hartwig al observar la nebulosa de Andrómeda descubriera casualmente una nueva estrella, pues más tarde resultó que aquella estrella era la primera supernova vista en otra galaxia. Pero este hecho posterior no fue mérito de Hartwig. No es únicamente el éxito intelectual lo que da dividendos a un descubridor, sino la importancia posterior de su descubrimiento. Van Maanen tuvo que sufrir el efecto contrario. Su error desempeñó un papel tan decisivo en el debate de los Universos islas que se cita más este error que las aportaciones positivas del astrónomo. Cuando se estudia actualmente el trabajo científico de van Maanen se miran con lupa sus errores sobre el movimiento de rotación de las galaxias. Esto es un elemento trágico en la vida de van Maanen, de quien cuenta Shapley en su autobiografía: «Era encantador, soltero, y él y yo éramos amigos, no sé por qué... Creo que nos complementábamos, pues él era una persona abierta y a mí me gustaba cuando se ponía divertido.»

Así pues, en el año 1924 el tema estaba ya decidido: Las nebulosas espirales son Universos islas, son sistemas galácticos como el nuestro, con toda la multiplicidad de manifestaciones que observamos en el nuestro. A pesar de ello, el Universo no estaba todavía en orden. Cuando 15 años después se concedió a Shapley la medalla de una sociedad astronómica, Hamilton M. Jeffers escribió en su encomio: «Continúa habiendo indicios de que nuestro sistema galáctico es especialmente "único", a saber, de mayor tamaño que todos los demás sistemas exteriores.» En septiembre de 1932 se reunió la Unión Astronómica Internacional en Cambridge. Massachussetts, y sir Arthur Eddington, el gran astrofísico de Cambridge. Inglaterra, dio una lección pública. «...Si las nebulosas espirales son islas, nuestra Vía Láctea es un continente», dijo. Y luego: «No me resulta nada simpática la idea de que nosotros debamos pertenecer a la aristocracia del Universo.»

Walter Baade aleja más la nebulosa de Andrómeda

Pasarían 20 años hasta que el mundo astronómico se enterara de que nuestra Vía Láctea no tiene ninguna preeminencia en el Universo. La novedad se dio a conocer de nuevo en una sesión de la Unión Astronómica Internacional. Fue en 1952 en Roma. Un astrónomo naturalizado norteamericano pero procedente de la región de Nordrhein-Westfalia se ocupó de dar la sorpresa de Roma y de demostrar que nuestra Vía Láctea no es ninguna aristócrata del Universo, sino una simple ciudadana. Al mismo tiempo eliminó otra imperfección estética de nuestra imagen del Universo, que comentaremos en el siguiente capítulo.

En el año 1926 un astrónomo alemán recibió una beca Rockefeller. Walter Baade, nacido en Schröttinghausen, había estudiado en Münster y Gotinga y trabajaba en el Observatorio de Hamburg-Bergedorf. Durante su estancia en los Estados Unidos financiada por la beca llegó también al Observatorio de Lick y al de Monte Wilson. Probablemente la visita al Observatorio de Monte Wilson fue decisiva para su vida. Cinco años

después le ofrecieron una plaza en este observatorio. Permaneció allí hasta su jubilación, y luego regresó a su patria; murió en 1960 en Gotinga.

Baade estuvo preocupado durante toda su vida por saber qué tipos de estrellas hay en los distintos sistemas estelares. Baade fue el primero en observar que en el halo de la Vía Láctea donde están los cúmulos globulares también pueden encontrarse estrellas solas, y que se trata del mismo tipo de estrellas que vemos en los cúmulos globulares. Observó además que las estrellas de las espirales son de otro tipo. En los brazos espirales las estrellas más brillantes son azules o rojas, mientras que las estrellas más brillantes del halo son siempre rojas. Pudo ver esto con especial claridad en la nebulosa de Andrómeda. Nosotros vemos este sistema estelar desde fuera y podemos descubrir muchas más cosas en él que cuando intentamos reconocer la estructura de nuestra galaxia desde nuestro punto de vista, es decir, desde dentro. «Una región cubierta de bosques», escribió en cierta ocasión Olin C. Wilson, colega de Baade, «puede verse mejor desde el aire que desde un punto de su interior, en medio de los árboles». Baade descubrió así que en la nebulosa de Andrómeda y en la Vía Láctea hay dos *poblaciones* de estrellas: las estrellas de la población del disco y las de la población del halo. En el sueño del señor Meyer del capítulo 3 utilizamos ya el descubrimiento de Walter Baade.

Baade investigó también las estrellas cefeidas de la nebulosa de Andrómeda descubiertas por Hubble. Le benefició mucho el hecho de que durante la II Guerra Mundial la ciudad de Los Ángeles estuviera a oscuras y de que pudiera fotografiar con el espejo de 2,5 m estrellas más débiles de lo posible en época normal. Pudo dar el siguiente paso en la investigación de las estrellas variables de la galaxia de Andrómeda cuando se puso en marcha el espejo de 5 m, en noviembre de 1948. Este telescopio lo había planeado ya en 1923 el entonces director del Observatorio de Monte Wilson, George Ellery Hale. Pudo completarse diez años después de su muerte. Este telescopio reflector situado en la cima del monte Palomar a 1.706 m de altura proporcionaba a Baade un instrumento que multiplicaba por cuatro la superficie de captación del hasta entonces mayor

telescopio del mundo, el espejo de 2.5 m. La montaña está situada al sur de Los Ángeles, pero el nuevo telescopio pertenece al Observatorio de Monte Wilson, cuyo nombre se transformó a partir de entonces en Observatorios de Monte Wilson y Monte Palomar.

Baade puso inmediatamente manos a la obra. Había calculado que con el nuevo instrumento podría encontrar estrellas RR Lyrae en la nebulosa de Andrómeda. Pero estas estrellas variables no aparecieron en sus fotografías. Algo no cuadraba. Sin embargo él había calculado de modo preciso la distancia de la nebulosa de Andrómeda basándose en el método de Hubble: había determinado el período de las estrellas cefeidas de la nebulosa, y la relación período-luminosidad calibrada por Shapley le había proporcionado la luminosidad de aquellas estrellas. Luego, comparando este valor con el brillo aparente obtuvo unos 300 kpc de distancia, la misma que Hubble. A esta distancia el nuevo telescopio tenía que permitirle ver las estrellas RR Lyrae, que se cuentan por centenares en los cúmulos globulares y que probablemente son igual de frecuentes entre las estrellas individuales del halo de este sistema estelar. Pero las estrellas RR Lyrae de la nebulosa de Andrómeda continuaban invisibles.

Baade encontró la solución del enigma, y su anterior descubrimiento sobre la diferencia de poblaciones le proporcionó la clave. Shapley había calibrado la relación período-luminosidad basándose en las estrellas RR Lyrae, es decir, en estrellas del halo. Pero Baade, como todos los astrónomos anteriores a él, al determinar la distancia de la nebulosa de Andrómeda había utilizado estrellas pulsantes en los brazos espirales de la nebulosa de Andrómeda, es decir, estrellas del disco. ¿Pero quién puede decir que las estrellas pulsantes del disco satisfacen la misma relación período-luminosidad que las del halo? Una investigación más precisa dio como resultado que una estrella pulsante de la población del disco es cuatro veces más brillante que una estrella pulsante de la población del halo de igual período. Era preciso pues calibrar de nuevo la relación período-luminosidad de la población del halo. Había que revisar todas las distancias obtenidas con las estrellas pulsantes de

la población del disco, a saber, las distancias de la nebulosa de Andrómeda y de algunas nebulosas espirales cercanas. El resultado fue que a partir de entonces tuvieron que duplicarse todas las distancias entre las galaxias. El tamaño del Universo se había multiplicado por dos.

El Universo estaba de nuevo en orden. Si antes había parecido que nuestro sistema galáctico era el de mayor tamaño, ahora todas las galaxias se habían alejado de nosotros y por lo tanto resultaban mayores de lo imaginado. Nuestro sistema no destacaba ya ni por un tamaño especial ni por otras propiedades notables. Pero nos hemos avanzado al curso de los acontecimientos.

Estamos todavía en el año 1924, y Hubble acaba de confirmar la teoría de los Universos islas. El tiempo está maduro para el mayor descubrimiento cosmológico de la primera mitad de este siglo, y de nuevo Hubble desempeñará un papel central en él.

VI. EL UNIVERSO EN EXPANSIÓN

> La unanimidad con que se alejan todos los sistemas galácticos casi parece demostrar una antipatía declarada de ellos hacia nosotros. No comprendemos por qué nos evitan de este modo, como si nuestra isla fuera un tumor pestilencial del Universo.
>
> SIR ARTHUR EDDINGTON (1882-1944)

Imaginémonos situados en el año 1924. Hubble había descubierto hacía poco estrellas cefeidas en la nebulosa de Andrómeda y había determinado su distancia. En la cuestión de los Universos islas Curtis había vencido a Shapley. El Universo estaba ahora lleno de galaxias, las más próximas de las cuales se nos aparecen en el cielo como nebulosas espirales. La paradoja de Olbers (ver la introducción) volvía con todo honor. Si el Universo está lleno uniformemente desde siempre de galaxias inmóviles, en cualquier dirección del cielo hacia donde dirijamos nuestra mirada tenemos que ver una galaxia y en ella la superficie brillante de una estrella. Si nuestra mirada atraviesa una galaxia pasando de largo por todas sus estrellas tenemos que ver alguna galaxia más lejana situada detrás suyo y la superficie brillante de una de sus estrellas, o la de una estrella de una galaxia situada todavía más lejos. Miremos donde miremos siempre tenemos que encontrarnos al final una superficie estelar y nuestro cielo nocturno ha de brillar tanto como el disco solar.

De entrada parece fácil salirse de la paradoja de Olbers. Esto pensó el mismo Olbers, quien dio a su tratado el título: «Sobre la transparencia del espacio.» Olbers creyó que la negrura del cielo nocturno demostraba que el espacio interestelar está lleno de materia, quizá enormemente enrarecida, que debilita mucho la luz de las estrellas muy lejanas. Aunque nuestra mirada hacia el cielo cae casi siempre sobre una superficie estelar que está tan caliente como la superficie del Sol, la materia

interpuesta la debilita tanto que no ilumina de modo notable el cielo.

Hoy en día, cuando observamos en el espacio nubes oscuras que debilitan considerablemente la luz de las estrellas situadas detrás suyo, quizá nos sintamos inclinados a aceptar la idea de Wilhelm Olbers. Pero no podemos decidirnos tan rápidamente. Si el Universo estuviera lleno desde tiempo infinito de estrellas y de nubes absorbentes, la materia oscura habría recogido la energía de las estrellas lejanas antes de que ésta llegara a nosotros. Pero la energía no puede perderse sin más, por lo tanto las nubes han de calentarse: su temperatura ha de aumentar lentamente. Este proceso seguirá hasta que la materia de las nubes tenga la misma temperatura que las superficies estelares. Pero entonces las nubes radiarán igual que las estrellas, y tendremos de nuevo un cielo brillante. Aunque las nubes debiliten la luz de las galaxias lejanas, continuará colgando de nuestros cuellos la rueda de la paradoja de Olbers.

La solución llegó en el año 1929, puesto que todavía no se había agotado la vena de oro descubierta por los astrónomos de California con sus nuevos y grandes telescopios.

Las grandes velocidades de las nebulosas espirales

Mientras en California, en el Monte Wilson cerca de Los Angeles y en el Monte Hamilton cerca de San Francisco, se reunían los materiales para decidir si las nebulosas espirales eran galaxias o no. Vesto M. Slipher (1875-1969), del Observatorio Lowell, en Flagstaff, Arizona, había tomado espectros de nebulosas espirales con el telescopio reflector de 60 cm. Empezó con la nebulosa más brillante, la de Andrómeda. Pero incluso ella brillaba tan débilmente que Slipher necesitó casi siete horas de exposición. A fines de otoño y en invierno del año 1912 obtuvo en cuatro noches cuatro espectros utilizables y se propuso deducir de ellos la velocidad radial de la nebulosa de Andrómeda. Los espectros de las nebulosas presentan líneas oscuras de absorción como los de las estrellas (hoy sabemos que de las nebulosas espirales sólo recibimos la luz acumulada

de miles de millones de estrellas), y Slipher quiso comprobar si estas líneas de la nebulosa de Andrómeda estaban desplazadas hacia el rojo o hacia el azul, es decir, si el cuerpo se alejaba o se acercaba a nosotros. Para ello el astrónomo comparó los espectros de la nebulosa con otros del planeta Saturno obtenidos con el mismo telescopio y con el mismo aparato espectral. Saturno refleja la luz solar, por lo tanto su espectro se aproxima al de una estrella normal. Puesto que Saturno se mueve en relación a la Tierra, su espectro muestra un efecto Doppler. Slipher conocía la velocidad relativa de la Tierra y Saturno y podía tener en cuenta este efecto. La comparación le permitió comprobar que la nebulosa de, Andrómeda se aproxima a nosotros con una velocidad de 300 km/s. «Esta es la mayor velocidad observada hasta el momento», escribió Slipher. Hay que recordar que en aquel entonces nadie sabía exactamente qué era la nebulosa de Andrómeda. Slipher intentó pues explicar imaginariamente la nova que Hartwig había descubierto en la nebulosa de Andrómeda en 1885. Si la nebulosa se desplaza por el espacio con una tal velocidad, pensó Slipher, quizá chocó con una estrella, y esto explicaría el fenómeno luminoso. ¡Slipher escribió esto ocho años antes del debate entre Curtis y Shapley! Todavía no se había excluido la posibilidad de que las nebulosas espirales fueran cuerpos vagabundos de nuestro sistema galáctico. Si se desplazaban con velocidades no observadas hasta entonces en ninguna estrella, quizá podían calentar de modo anormal una estrella interpuesta en su camino.

Pero pronto los posteriores trabajos de Slipher proporcionarían argumentos en favor de la hipótesis de los Universos islas. Slipher amplió sus investigaciones a nebulosas espirales de luz todavía más débil. Esto exigía tiempos de exposición todavía más largos. A menudo se necesitaban exposiciones de hasta 40 horas, y una noche no bastaba. Slipher exponía la placa toda la noche, cerraba la cajita que contenía la placa fotográfica, dirigía en la noche siguiente el telescopio al mismo objeto y quitaba la tapa de la cajita para continuar exponiendo la placa. A menudo el proceso duraba varias noches.

En el año 1917 publicó una nueva medición que le había proporcionado una velocidad radial de 1.120 km/s. Esta nebulosa espiral, en la que pueden verse claramente las espirales, no se acerca a nosotros con una velocidad enorme como la nebulosa de Andrómeda, sino que se aleja de nosotros. Todas las líneas de Fraunhofer de los espectros de Slipher estaban desplazadas hacia las ondas más largas, hacia la región del espectro ocupada por el color rojo. En los años siguientes se demostró que casi todas las nebulosas de los espectros de Slipher presentaban desplazamientos claros de las líneas de Fraunhofer hacia longitudes de ondas más largas. La única explicación de este fenómeno era suponer que el desplazamiento hacia el rojo se debía al efecto Doppler y que estas nebulosas se alejaban de nosotros; había que deducir por lo tanto que las nebulosas espirales medidas se alejaban de nosotros con velocidades de hasta 1.800 km/s.

Las enormes velocidades radiales que los astrónomos norteamericanos iban encontrando en un número creciente de nebulosas espirales (figura 6-1) no dejaban tranquilos a sus colegas europeos. Ellos no disponían de instrumentos grandes comparables, y las condiciones climáticas europeas no justificarían tales aparatos ni en la Europa central ni en la nórdica. Ya en 1913 Max Wolf, del Observatorio de Königstuhl, en Heidelberg, animado por las mediciones de Slipher del año anterior, había intentado medir la velocidad radial de la nebulosa de Andrómeda. Obtuvo una velocidad de aproximación muy alta, de 400 km/s. Estudió luego otras nebulosas espirales y vio que tres de ellas se alejaban de nosotros. Wolf no confió en los demás valores de las velocidades de fuga porque ya había obtenido un resultado demasiado elevado para la nebulosa de Andrómeda. «Por desgracia nuestro espectrógrafo y nuestro clima», escribió, «no son los más adecuados para esta tarea».

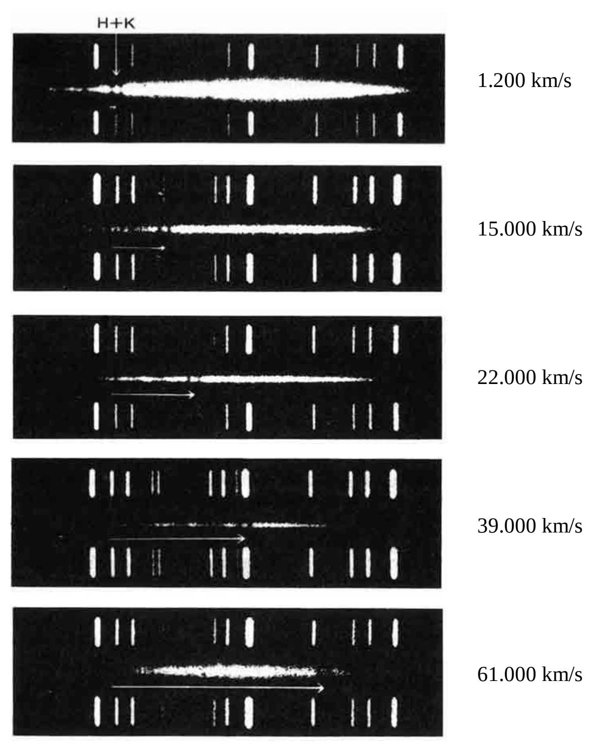


Fig. 6-1. Desplazamiento hacia el rojo en luz visible de los espectros de cinco galaxias. Los espectros son en cada caso las tiras horizontales brillantes del centro. Son espectros de objetos débiles y en ellos se observan pocos detalles. El efecto se ve más claramente en dos líneas de Fraunhofer debidas a los átomos del elemento calcio, dos muescas indicadas en el espectro superior izquierdo por H + K. En esta galaxia que se aleja de nosotros a «sólo» 1.200 km/s, el efecto Doppler provoca un reducido desplazamiento hacia el rojo, indicado por una pequeña flecha horizontal. Debajo están reproducidos espectros de galaxias con mayores velocidades de fuga. Las dos líneas de Fraunhofer se desplazan cada vez más hacia el extremo rojo (derecha) del espectro, como señalan en cada caso las flechas blancas. Las líneas verticales gruesas y brillantes a ambos lados de cada espectro son líneas de emisión de un gas que está en reposo en relación al aparato fotográfico, y que facilitan la medición del desplazamiento de las líneas de absorción de las galaxias (fotografía: Palomar Observatory.)

Con mayor interés si cabe se seguían las publicaciones de los Estados Unidos y se mantenía un animado intercambio de información. El gran astrónomo danés Ejnar Hertzsprung, una semana después de la publicación por Slipher de su resultado sobre la nebulosa de Andrómeda le había escrito así: «Me parece que con este descubrimiento la gran cuestión sobre la pertenencia de las nebulosas espirales al sistema galáctico debe contestarse con mayor seguridad diciendo que no pertenecen a él.» Hay que recordar que la respuesta definitiva se dio 13 años después con el descubrimiento por Hubble de las cefeidas en la nebulosa de Andrómeda. Pero Hertzsprung consideró improbable que en nuestra Vía Láctea pudieran moverse cuerpos con velocidades relativas de 300 km/s. Knut Lundmark, el astrónomo sueco de Uppsala que a principios de los años veinte estuvo invitado en California y de quien ya he hablado en el capítulo 5, participó también en la discusión sobre la naturaleza de las nebulosas espirales y se convirtió en defensor de la hipótesis de los Universos islas.

En aquella época trabajaba en Kiel Carl Wilhelm Wirtz (1876-1939). Le preocupaban las grandes velocidades radiales que había medido Slipher, e intentó deducir de ellas alguna regularidad. Se preguntó si las nebulosas cuyas espirales giraban desde nuestro punto de vista hacia la derecha se alejaban preferentemente de nosotros, o si lo hadan las que giraban hacia la izquierda. También se discutió la cuestión de si aquellas nebulosas que vemos de canto presentan distinta velocidad que aquellas que vemos perpendicularmente al disco. Wirtz no encontró ninguna regla sencilla. Sólo quedaba por ver si las más lejanas se desplazaban más deprisa que las más próximas. Esto era más difícil de apreciar, porque antes de 1924, es decir, antes de que Hubble hubiera descubierto las primeras cefeidas en la nebulosa de Andrómeda, no se sabía cómo proceder para deducir la distancia a las nebulosas espirales. Sin embargo, había una débil esperanza de estimar esta distancia. Si todas las nebulosas espirales tuvieran aproximadamente el mismo tamaño, las más alejadas han de aparecer en el cielo más pequeñas que las más próximas. Lundmark por un lado y Wirtz por otro intentaron a partir del escaso material existente descubrir si las

nebulosas espirales que en el cielo parecen más pequeñas presentan un comportamiento distinto del de las nebulosas mayores. Wirtz creyó haber descubierto una regularidad y en marzo de 1924 escribió en *Astronomischen Nachrichten* que «no hay duda de que el movimiento radial positivo de las nebulosas espirales aumenta considerablemente al aumentar la distancia». (Los astrónomos se han puesto de acuerdo en considerar positivo un movimiento radial que se aleja de nosotros, es decir, con el cual aumenta la distancia, y negativos los demás casos. Por lo tanto, la nebulosa de Andrómeda tiene una velocidad radial negativa, puesto que se mueve hacia nosotros.)

Las nebulosas espirales cuanto más lejos están con mayor velocidad se alejan de nosotros: esto dijo Wirtz. Carl Wilhelm Wirtz había nacido en Krefeld. Estudió astronomía en Bonn, trabajó allí y en un observatorio en Viena, dio clases en la Escuela de Navegación de Hamburgo hasta que fue nombrado observador en Estrasburgo. Cuando Alsacia pasó a Francia, tuvo que abandonar Estrasburgo. Fue profesor de astronomía en Kiel. En 1937 perdió su cátedra por motivos políticos. Después de un viaje a Norteamérica de medio año murió en 1939 en Hamburgo. Lundmark y Wirtz intuyeron el inminente descubrimiento pero sólo pudieron formular suposiciones porque no tenían ninguna posibilidad de observar con grandes telescopios y determinar las distancias de las nebulosas espirales.

Mientras tanto Hubble, después de haber calculado la distancia de la nebulosa de Andrómeda, había intentado también determinar en el Monte Wilson las distancias de otras nebulosas espirales. En un trabajo publicado en 1929 con el título «Una relación entre la distancia y la velocidad radial de las nebulosas extragalácticas» comunicó una noticia sensacional: cuanto más lejos está una galaxia, con mayor velocidad se aleja de nosotros. La relación que había descubierto era de la máxima sencillez imaginable: doble distancia, doble velocidad de recesión, triple distancia, triple velocidad de recesión... *La velocidad de recesión es proporcional* a *la distancia* (fig. 6-2). El factor de proporcionalidad de esta relación se llama desde entonces *constante de Hubble,* y se abrevia generalmente con una H. El descubrimiento de Hubble puede escribirse así:

Velocidad de recesión = H × distancia.

Cuando Hubble descubrió esta regularidad sólo disponía de las velocidades radiales de 46 galaxias: de ellas 41 procedían de Slipher. Menos material tenía todavía para las distancias. Sólo disponía de los valores aproximados de 24 objetos. Para que los números de la relación de Hubble sean manejables, la velocidad de recesión se suele dar en km/s y la distancia en Mpc. Con estas unidades el valor numérico determinado por Hubble para H es 500. Por lo tanto, una galaxia situada a un Mpc de nosotros se aleja con una velocidad de 500 km/s, una situada a 10 Mpc lo hace con una velocidad de 5.000 km/s. Todas las galaxias, a excepción de unas cuantas próximas a nosotros, se alejan según la ley de Hubble, las más lejanas más rápidamente que las más próximas.

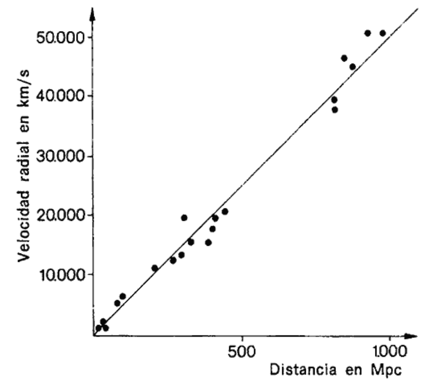


Fig. 6-2. Ley de Hubble. Cuanto mayor es la distancia (representada hacia la derecha) mayor es la velocidad de fuga (representada hacia arriba). La relación dibujada aquí corresponde al valor de la constante de Hubble utilizada en este libro, es decir 50, no al valor de 500 que dio al principio Hubble (ver la fig. 6-6 para la historia de esta constante).

Cuatro de las velocidades radiales de los 24 objetos con los que Hubble había determinado su ley de la recesión de las galaxias habían sido calculadas por Milton. L. Humason, quien a

partir de 1928 se convirtió en un nuevo e inapreciable colaborador de Hubble. En nuestra colección de personajes procedentes de otros campos que luego dieron impulso a la investigación galáctica teníamos ya a un músico, un periodista de temas legales, un profesor de lenguas antiguas y un jurista boxeador. Ahora entra en escena un arriero.

Humason no tenía ninguna formación científica. Su contacto con la astronomía empezó mientras llevaba cargas al Monte Wilson con animales de basto. Empezó entonces a interesarse por la actividad de la gente de la montaña. Pronto ascendió a conserje del observatorio y al cabo de poco tiempo a ayudante nocturno. Luego ayudó a los astrónomos en sus observaciones. Su trabajo impresionó de tal modo a Shapley y a los demás que le concedieron una plaza fija de astrónomo.

Humason reunió espectros de las galaxias cuya distancia había determinado Hubble. Aunque el reflector de 2,5 m era entonces el mayor telescopio del mundo, con una excelente potencia luminosa, Humason tuvo que distribuir en varias noches consecutivas su programa de observación de las nebulosas espirales más débiles, consistente en tiempos de exposición de 50 a 100 horas. Algunas nebulosas espirales eran tan débiles que no podían percibirse con el ojo en el ocular; sólo se conocía su existencia por fotografías de exposición prolongada. Humason tuvo que desplazar el ocular del buscador y mantener el retículo sobre una estrella guía vecina más brillante cuya distancia a la nebulosa espiral conocía gracias a las fotografías. Dispuso el aparato de modo tal que la nebulosa espiral quedara en el campo de visión del espectrógrafo cuando él apuntaba con el telescopio buscador en la dirección correcta. Humason tenía la habilidad de sacar el máximo partido imaginable de un telescopio.

Se cuenta de Humason una historia ilustrativa sobre el debate de los Universos islas. Hacia 1920 Shapley entregó a Humason unas cuantas placas de la nebulosa de Andrómeda para que buscara posibles cambios. Cuando Humason le devolvió las placas había marcado en ellas algunos puntos. Dijo que eran estrellas cefeidas. Entonces Shapley borró las marcas y explicó

a Humason, quien no había disfrutado de una formación astronómica, por qué en la nebulosa no podía haber ninguna cefeida.

¿Había descubierto Humason las primeras cefeidas en la nebulosa de Andrómeda cuatro años antes que Hubble? Ambos participantes han muerto ya. Sólo tenemos la anécdota que se cuenta en varios observatorios norteamericanos. Shapley ya no se acordaba cuando a principios de los años setenta le preguntaron sobre el tema, pero dijo que podía haber pasado algo por el estilo.

En el año 1931 Hubble y Humason determinaron el valor de la constante de Hubble: 558.

¿Estamos en el centro del Universo?

A primera vista tenemos la sensación de que somos algo especial: todo parece alejarse del punto en el cual nos encontramos. La frase de Eddington citada al principio de este capítulo se refiere a esta situación.

No tenemos ningún motivo para suponer que estamos en el centro del Universo. Voy a explicarlo con una comparación. Imaginemos una masa de levadura preparada para un gran pastel, es decir, con pasas en su interior y a una temperatura tal que la levadura hinche la masa. Situémonos en la posición de una pasa. Mientras la masa va aumentando lentamente de volumen, la pasa observa que todas las demás pasas se alejan de ella. El cambio de las pasas próximas apenas es perceptible, pero las pasas más lejanas se alejan con mayor velocidad. No sólo esto, sino que existe una relación simple entre la velocidad con que una pasa se aleja de ella y su distancia: a doble distancia, doble velocidad... Esta pasa observa en relación a sus compañeras una especie de ley de Hubble. ¿Debe deducir de ello que se encuentra en el centro de la masa? No, porque *cada* pasa descubrirá que todas las demás se alejan de ella, y que la velocidad de recesión y la distancia son proporcionales entre sí.

Nos sucede exactamente lo mismo con las galaxias del Universo. Aunque nos parezca que todas se alejen precisamente de

nosotros, no debemos deducir de ello que somos pasas instaladas en el centro del Universo.

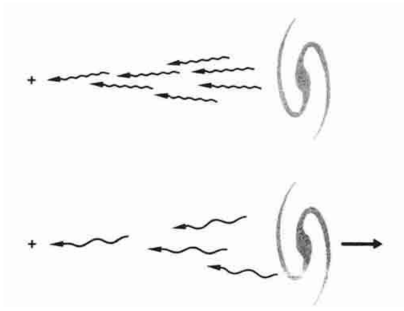


Fig. 6-3. Efectos de enrojecimiento y de enrarecimiento de una galaxia que se aleja de nosotros, que estamos situados en la pequeña cruz de la izquierda. Arriba: llegan de una galaxia cuantos de luz (flechas onduladas) con una determinada longitud de onda. Sólo hemos dibujado para simplificar cuantos de idéntica longitud de onda. Si la galaxia se aleja de nosotros (abajo), cada cuanto de luz llega con una longitud de onda menor (es decir, parece más rojo). Además, cada segundo llegan menos cuantos de luz (es decir, la radiación nos parece enrarecida).

El movimiento de expansión y la paradoja de Olbers

¿Por qué es oscuro el cielo nocturno? Quizá en cualquier dirección que miremos siempre vemos la superficie de una estrella. Pero el Universo se expande. Cuanto más lejos está una estrella sobre cuya superficie cae nuestra mirada, con mayor velocidad se aleja de nosotros. Cada cuanto de luz que llega de ella está enrojecido por el efecto Doppler, pierde energía. Llamaremos a este fenómeno el *efecto de enrojecimiento.*

Hasta ahora nos hemos referido principalmente a este tema al hablar de las líneas espectrales desplazadas hacia el rojo de un cuerpo que se aleja de nosotros. El efecto de enrojecimiento se debe al desplazamiento hacia el rojo de todos los cuantos de luz del espectro continuo de un cuerpo luminoso que se aleja de nosotros. No es más que el fenómeno discutido en el capí-

tulo 3, según el cual un trozo de hierro calentado al blanco parece más frío, y por lo tanto más rojo, cuando nos alejamos de él.

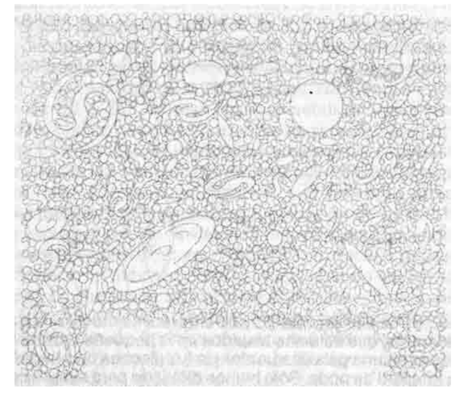


Fig. 6-4. La paradoja de Olbers con el cielo lleno de galaxias. Si las galaxias estuvieran distribuidas uniformemente e inmóviles en el espacio infinito desde un tiempo infinito, el cielo sería tan brillante como el disco solar.

Pero también hay otro efecto. Si un cuerpo inmóvil envía en nuestra dirección cada segundo un millón de cuantos de luz, cada segundo recibiremos el mismo número de cuantos. Pero si el cuerpo se aleja de nosotros, cada cuanto sucesivo necesita cubrir un trayecto superior al del cuanto emitido antes. Por lo tanto, tardará más tiempo y llegará algo después. Los cuantos de luz llegan pues a intervalos de tiempo superiores a los de su emisión, igual que las palomas mensajeras enviadas por el viajero a su casa (pág. 86). Esto significa que nosotros recibimos cada segundo un número de cuantos inferior al emitido durante el mismo tiempo, con independencia de que cada cuanto de luz llegue más rojo, es decir, con una energía inferior a la que tenía cuando se emitió. Llamaremos a esto *efecto de enrarecimiento.* Ambos efectos debilitan la luz de las galaxias tanto más cuanto más lejos estén en el espacio, es decir, según la ley de Hubble, cuanto más rápidamente se alejan de nosotros (fig. 6-3). Cuando miramos el cielo nocturno miramos en realidad en todas direcciones a las galaxias y en ellas a las superficies de sus

estrellas (fig. 6-4). Los cuantos de luz de galaxias lejanas nos parecen de longitud de onda más larga y por lo tanto de energía menor, y nos llegan a intervalos temporales mayores. Su radiación queda pues mucho más debilitada. Cuando miramos de noche el fondo del cielo no vemos la luz de innumerables estrellas lejanas inmóviles, sino la superposición de la luz de las estrellas de muchas galaxias lejanas que se alejan de nosotros. Su luz está debilitada por el movimiento de expansión (fig. 6-5). Se dice a menudo que este debilitamiento de la luz de las galaxias que se alejan de nosotros oscurece el cielo nocturno. Sin embargo, el cosmólogo de la Universidad estadounidense de Massachusetts Edward R. Harrison ha dado una demostración sencilla para explicar que este efecto sólo oscurecía de modo reducido un cielo nocturno que debería brillar como el Sol.



Fig. 6-5. Los efectos de enrojecimiento y de enrarecimiento debilitan la luz de las galaxias que se alejan de nosotros. Las más distantes (en el dibujo las más pequeñas) se alejan de nosotros con velocidad mayor. Por lo tanto su luz es la más debilitada.

Los efectos de enrojecimiento y de enrarecimiento explican un fenómeno que hemos citado en relación al sueño del señor Meyer (pág. 89). Si observo un cuerpo, por ejemplo, de 2.000°K, mostrará un espectro como el de la figura 2-9. Pero

si el cuerpo radiante se aleja de mí con gran velocidad, los efectos de enrojecimiento y enrarecimiento me harán creer que su luz es más débil y de mayor longitud de onda. El cuerpo me parecerá más frío. Si se aleja de mí a una velocidad de 84.000 km/s estaré observando la luz de un cuerpo que radia a 1.500°K. En realidad el cuerpo posee un espectro que corresponde a la curva superior de la figura 2-9, pero la gran velocidad con que se aleja de mí me hace pensar que su espectro es el de la curva inferior.

El enrarecimiento y la coloración de la luz de las estrellas de las galaxias que se alejan de nosotros no debilitan la luz lo suficiente para explicar la oscuridad del cielo nocturno. ¿Pero se trata realmente de un problema de luz estelar? Cuando miramos cada vez a mayores distancias nos adentramos cada vez más en el pasado, en una época en la que quizá no había galaxias ni estrellas. Nuestra mirada se posa sobre una materia que conserva su forma original. Si esta materia estaba oscura, detrás de las múltiples estrellas y galaxias actuales miramos la materia oscura y no estructurada del principio del mundo. Quizás sea éste el motivo que explica la oscuridad de la noche. Volveremos pues a la paradoja de Olbers en el capítulo 12, cuando sepamos más cosas sobre la materia que apareció sin estructura en los orígenes del Universo.

¿Cuándo empezó todo?

Si todas las galaxias se alejan unas de otras, podemos remontarnos mentalmente en el pasado y llegar a épocas en las que las galaxias estaban más juntas. ¿Hasta dónde podemos llegar? ¿Cuándo estaban todas las galaxias apretadas unas con otras? ¿Cuándo se produjo aquella enorme explosión primigenia que fue el principio de todo? Si suponemos para simplificar que la velocidad de recesión entre dos galaxias fue siempre la misma podremos saber en qué momento tuvieron que estar juntas. Conocemos la distancia y la velocidad. La distancia *dividida* por la velocidad da el *tiempo.* El valor numérico de la

constante de Hubble determinado por Hubble y Humason permite deducir que la explosión primigenia tuvo lugar hace 1.800 millones de años. ¿Empezó realmente el Universo hace 1.800 millones de años? Esto plantea nuevos problemas.

Hay varios métodos para calcular la edad de la Tierra. Los elementos radiactivos que se desintegran lentamente dando otros elementos son relojes de larga vida. A medida que transcurre el tiempo, un elemento se desintegra y los demás, los productos de la desintegración, se enriquecen. Podemos deducir de ello cuándo se solidificaron los elementos radiactivos en la corteza terrestre. Pero la expansión de Hubble da un tiempo demasiado corto. Eddington escribió en aquella época, algo preocupado por la velocidad de expansión del Universo: «Nosotros no esperábamos la inalterabilidad; sin embargo, confiábamos en encontrar una permanencia mayor que en las condiciones terrestres. Y ahora casi parece que el cielo cambie con mayor rapidez que la Tierra.»

Los geólogos empezaron a mirar de reojo a los astrónomos por sus oscuros resultados. ¿Qué clase de científico puede afirmar que el Universo es más joven que la Tierra? La solución estaba en el error de la determinación de distancias, que se basaba todavía en la relación período-luminosidad calculada por Shapley para las estrellas cefeidas. Hemos visto que hubo que esperar a 1952 para que Baade resolviera adecuadamente la calibración de esta relación. De hecho todas las distancias entre las galaxias quedaron situadas al doble de lo que antes se suponía. Las velocidades radiales determinadas con ayuda del efecto Doppler no fueron afectadas por la revisión de distancias de Baade, por lo que la constante de Hubble pasaba a valer la mitad y la edad del Universo deducible de ella por tanto se multiplicaba por dos. En 1952 se volvió a calcular la constante de Hubble con ayuda de la nueva escala de distancias de Baade, obteniéndose el valor de 290, lo que daba al Universo una edad de unos 3.500 millones de años. Esto ya no contradecía tanto el valor que los geólogos querían tener.

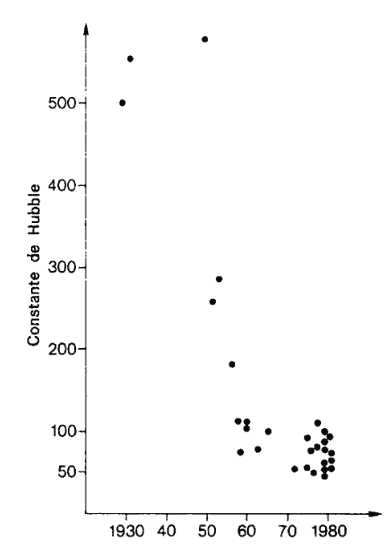


Fig. 6-6. Historia agitada de la constante de Hubble. Su valor original era 550 y más, pero hacia 1950 bajó considerablemente. Hoy se citan los valores 50 y 100 y todos los intermedios.

Pero en la época que siguió a 1952 la constante de Hubble tuvo una historia muy agitada (fig. 6-6). Las cefeidas sólo sirven como indicadoras de distancias hasta unos 4 Mpc. Si una nebulosa espiral está más lejos ya no podemos reconocer desde la Tierra individualmente sus cefeidas. Su luz se confunde con el brillo debilitado de toda la nebulosa. Incluso las novas, que se ven brillar en las galaxias cercanas y cuya luminosidad máxima se confía que no varíe mucho de una galaxia a otra para que puedan servir de lámparas patrón, ya no pueden distinguirse individualmente en las galaxias lejanas. Hay que buscar por lo tanto nuevas fuentes patrón de luz. Estas fuentes pueden calibrarse en las galaxias cuyas distancias pueden calcularse todavía con ayuda de las cefeidas. De este modo pueden cogerse las estrellas más brillantes de cada galaxia. Se ha visto que en todas las galaxias donde han sido posibles las comprobaciones, porque disponíamos de distancias medidas con cefeidas, las estrellas más brillantes tenían aproximadamente la misma luminosidad. Las supernovas son fuentes patrón todavía mejores. En el máximo de la explosión resultan tan brillantes que pueden verse a grandes distancias en el espacio. Con ellas

puede llegarse a los 150 Mpc. A mayor distancia ya no nos sirve ningún objeto estelar. En el apéndice D veremos cómo puede proseguirse a pesar de ello la medición del Universo.

La corrección de Baade en 1952 determinó la escala de distancias para las galaxias hasta 4 Mpc. Los astrónomos casi han olvidado que en el año 1950 Alfred Behr había propuesto una corrección de la escala de distancias cósmicas. En aquella fecha envió desde Friburgo en Breisgau un trabajo a la redacción de *Astronomischen Nachrichten* donde planteaba multiplicar por 2.2 las distancias propuestas por Hubble y dar a la constante de Hubble el valor 260. Se basaba para ello en la distancia que Hubble había dado a la nebulosa de Andrómeda y señalaba errores en el paso a galaxias más lejanas. George Gamow escribió en 1951 su popular libro *The Creation of the Universe*. Utilizó todavía el valor de Hubble y Humason para la constante de Hubble y discutió las contradicciones que esto planteaba con la edad obtenida con medios geofísicos. Pero Gamow conocía ya la corrección de Behr y creyó que era una posible salida de la discrepancia. Gamow no podía imaginar que sus cálculos pronto se tendrían que revisar. En el año siguiente Baade descubrió que la nebulosa de Andrómeda estaba situada a una distancia doble de la supuesta por Hubble. La corrección de Behr y de Baade ampliaban en su conjunto el Universo en un factor de cuatro. La edad del Universo era ya de 7.000 millones de años. Los astrónomos decían: el buen Dios ha creado el Universo, pero Behr y Baade lo han multiplicado por cuatro.

La historia agitada de la constante de Hubble después de 1952 se debe a que se cometieron errores en las fuentes de luz patrón para distancias mayores (ver el apéndice D). Pasó así un tiempo hasta que se descubrió que las supuestas estrellas más brillantes de galaxias lejanas eran en realidad nubes gaseosas que brillaban excitadas por estrellas jóvenes. Pero esto no tuvo ninguna influencia sobre la distancia de la nebulosa de Andrómeda que se basaba en el método de las cefeidas, el cual nadie desde 1952 ha modificado de modo apreciable.

Hoy la constante de Hubble oscila entre 50 y 100. Allan Sandage, de los Observatorios de Monte Wilson y Monte Palomar, y el astrónomo suizo Gustav Tammann han atribuido

hace poco un valor de 50 a la constante de Hubble después de un cuidadoso análisis. Nosotros utilizaremos este valor en el presente libro cuando tengamos que calcular distancias a partir de velocidades radiales y viceversa. El valor de 50 para la constante de Hubble corresponde a una edad del Universo de 20.000 millones de años. Si se utilizara en cambio el valor de 100, las nebulosas espirales habrían estado juntas hace sólo diez mil millones de años. Parece pues que los astrónomos ya están de acuerdo con los geofísicos. Pero los mismos astrónomos han desarrollado métodos para determinar la edad de las estrellas y de los grupos estelares. Parece que el récord de edad corresponde a los cúmulos globulares. El astrónomo canadiense, Pierre Demarque, que trabaja en la Universidad de Yale, después de una profunda investigación acaba de calcular que algunos cúmulos han de tener unos 16.000 millones de años. Esto podría conciliarse todavía con el valor de 50 que Sandage-Tammann dan a la constante de Hubble.

El Universo volvería a estar de nuevo en orden si no fuera por Gerard de Vaucouleurs. Este estadounidense de adopción, nacido en París en 1918 y que enseña en la Universidad de Texas en Austin, ha emprendido la laboriosa tarea de determinar la escala de distancias cósmicas. Para ello sigue un camino independiente de Sandage y Tammann. Las determinaciones de Sandage y Tammann concuerdan con las de de Vaucouleurs hasta distancias en las que pueden observarse cefeidas y determinarse con ellas las distancias. Por ejemplo, sus valores en relación a la nebulosa de Andrómeda concuerdan. Pero luego las distancias de Sandage y Tammann resultan el doble de las de de Vaucouleurs. ¿A qué distancia está de nosotros el cúmulo de Virgo? «A 24 Mpc», dicen Sandage y Tammann casi al unísono; «A 12 Mpc», dice de Vaucouleurs. En consecuencia, su constante de Hubble tiene el valor de 100. Si este valor es el correcto, nuestras ideas sobre la edad del Universo topan con dificultades, pues los cúmulos globulares serían más viejos que el Universo. En el capítulo 8 volveremos al problema que supone dar valores elevados a la constante de Hubble.

Si una persona no especialista sigue la agitada historia de la constante de Hubble, que se basa en valores distintos para

las distancias de las galaxias más lejanas, pensará desde luego que el terreno es bastante inseguro. Imaginemos a un sastre a quien el astrónomo confiesa en una prueba que por desgracia es imposible dar la medida del Universo con un factor de precisión superior a dos. ¿Qué pasaría si el sastre tampoco pudiera trabajar con mayor precisión? El astrónomo debería aceptar un traje con una manga que le llegaría quizás al codo y con una pierna que arrastraría por el suelo como una cola. El astrónomo exige a su sastre una precisión casi cien veces superior a la que él considera posible en el Universo. Pero de momento no podemos afinar más. Estamos pegados a la superficie de nuestro planeta e intentamos con los trucos más refinados determinar distancias en regiones a las que no podemos llegar. De todos modos, los trucos que utilizamos no son siempre suficientemente buenos.

Lo importante en la recesión de las galaxias descubiertas por Hubble no es el valor exacto de la constante que lleva su nombre. Seamos conscientes del alcance del descubrimiento de Hubble. En 1929 la astronomía daba por primera vez una indicación de que el Universo no existía desde tiempo infinito, sino que antes de un intervalo largo, pero *finito*, había tenido lugar un hecho que podríamos calificar quizá de origen del Universo. Finitud en lugar de infinitud: desde luego es una diferencia tan grande como del día a la noche. Si el Universo existiera desde un tiempo infinito podríamos remontarnos mentalmente al pasado, saltando con la imaginación millones y miles de millones de años sin que pudiéramos acercarnos en lo más mínimo al inicio del Universo. El acto de la creación quedaría relegado a un pasado infinitamente lejano. Podríamos decir correctamente que el Universo no habría nacido nunca, que siempre habría existido. Llegó entonces la indicación de que el Universo ha nacido hace unos cuantos miles de millones de años. El acontecimiento está situado desde luego a gran distancia de nosotros, pero lo que nos separa de él es un intervalo de tiempo finito. Cada año que salvamos mentalmente hacia el pasado nos acerca algo al momento de la creación.

Edwin Hubble nos ha revelado un Universo que se expande y que tiene un inicio antes de un tiempo finito. En los años siguientes se mantuvo fiel a la investigación galáctica (volveremos a saber más cosas de sus trabajos en el capítulo 9).

Hubble, el hombre de Missouri formado por Oxford, debió de estar siempre a gran distancia de sus contemporáneos. Shapley, a quien afectó mucho su demostración de la hipótesis de los Universos islas, no pudo simpatizar nunca con él. «Nos hemos visitado pocas veces» escribió más tarde Shapley en sus memorias de la época común pasada en el Observatorio de Monte Wilson. «...Él hablaba con un espeso acento de Oxford. Pero había nacido en Missouri, no muy lejos de donde nací yo, y probablemente conocía el dialecto de Missouri, pero hablaba "Oxford"... A las señoras que le rodeaban les gustaba mucho el estilo de Oxford.» Se cuenta que Shapley dijo en una ocasión: «Si alguien despierta de noche a Hubble, seguro que hablará como yo.»

Cuando los Estados Unidos entraron en la II Guerra Mundial, Hubble se presentó de nuevo al servicio activo, pero le destinaron al interior del país, y trabajó en investigaciones militares. Después de la guerra volvió al Observatorio de Monte Wilson. En el año 1953, mientras se preparaba para cuatro noches de observación en el Monte Palomar, murió repentinamente de un derrame cerebral.

Humason en su necrología recordó su primer encuentro con Hubble: «Fotografiaba en el foco Newton del espejo de 1,5 m, de pie, mientras guiaba el telescopio. Su figura, alta y vivaz, con la pipa en la boca, se erguía claramente recortada sobre el cielo. Un golpe de viento arrebujó su gabán militar contra su cuerpo, sacando de vez en cuando chispas de su pipa en la oscuridad de la cúpula de observación... La seguridad y el entusiasmo que demostraba aquella noche eran típicas de la manera con que se enfrentaba a todos sus problemas. Estaba seguro de sí mismo, tenía muy claro lo que quería hacer y cómo hacerlo.»

Galaxias que se acercan a nosotros

La primera velocidad radial que Slipher midió en una nebulosa espiral fue la de la galaxia de Andrómeda, que se acerca disparada hacia nosotros con una velocidad de 300 km/s. ¿Constituye esto un contraejemplo de la ley de Hubble, que hace poco acabamos de alabar tanto?

Unas pocas galaxias, concretamente las que están muy cerca de nosotros y que por lo tanto deberían mostrar un movimiento de recesión relativamente reducido, parece que se desvíen de la relación de Hubble. Todas las galaxias situadas a suficiente distancia se alejan de nosotros. ¿A qué se debe el extraño comportamiento de las galaxias próximas? Este comportamiento puede explicarse fácilmente. Llevamos a cabo nuestras mediciones desde la Tierra, que se desplaza alrededor del centro de la Vía Láctea junto con el Sol y las estrellas cercanas a una velocidad de 250 km/s. Observemos una nebulosa espiral hacia la cual nos desplazamos debido a nuestro movimiento giratorio alrededor del centro de la Vía Láctea. Supongamos de entrada que esta galaxia no participa en el movimiento de fuga de Hubble. En tal caso, puesto que *nosotros* nos dirigimos hacia ella, debería parecer que *ella* se acerca a nosotros. Si suponemos que toma parte en el movimiento de Hubble, y que la nebulosa espiral está muy cerca de modo que su velocidad de fuga es limitada, podría parecer igualmente que se moviera hacia nosotros. De hecho la mayoría de las galaxias que parece que se nos acerquen tienen en realidad un movimiento de recesión si se descuenta de la velocidad aparente medida el movimiento de la Tierra. Pero quedan todavía unos cuantos casos de galaxias que se acercan realmente a nosotros.

Pertenecen a nuestra vecindad inmediata. La Vía Láctea, la nebulosa de Andrómeda, las Nubes de Magallanes y por lo menos 15 galaxias más constituyen un subsistema de unos dos Mpc de diámetro. Las galaxias están tan próximas unas a otras que su atracción mutua influye en su movimiento. Además, todas las galaxias parece que presenten, aparte de su movimiento de recesión, otros movimientos pequeños e irregulares. En el caso de galaxias próximas, que poseen velocidades de Hubble

pequeñas, predominan las velocidades irregulares. Tomemos una galaxia situada a 1 Mpc de nosotros. Según la relación de Hubble debería alejarse con una velocidad de 50 km/s. Pero si su velocidad es mayor debido a los movimientos irregulares de las galaxias, y si apunta casualmente en nuestra dirección, la galaxia se nos acercará. Pero esto son refinamientos que sólo pueden aplicarse a las galaxias próximas; en las más lejanas dominan las velocidades de Hubble, y todo se aleja de nosotros.

La expansión parece ser una propiedad fundamental de nuestro Universo, si dejamos de lado algunas excepciones de nuestra inmediata vecindad. ¿Hasta qué punto es fundamental? ¿Se hace quizás todo mayor, crecen las estrellas y los planetas y también los terrenos, puesto que crecen las superficies? ¿Aumentan lentamente de tamaño nuestras casas y crecemos también nosotros junto con el Universo? Por extraordinarias que sean las velocidades de recesión de las galaxias lejanas, con las magnitudes a las que estamos acostumbrados la expansión sería inapreciable. Una persona crecería en un año menos de una diezmillonésima de milímetro. La distancia del Sol a la Tierra aumentaría 8 km en 1.000 años. ¡Si todas las constantes físicas se mantuvieran inalteradas, la longitud del año aumentaría dos segundos en 1.000 años, sin duda un efecto mínimo!

Pero aunque los buscáramos no descubriríamos nada. Al parecer es fundamental que el movimiento de expansión del Universo no se deba por ejemplo a una fuerza de repulsión interior de la materia, que intentaría sepáralo todo, incluso los átomos de nuestro cuerpo. Parece más bien un impulso inicial que recibió toda la materia. Cuando en las masas que se separaban se formaron condensaciones, que luego se convertirían en galaxias y estrellas, la gravedad las unió oponiéndose al movimiento de Hubble. Las galaxias, incluso los grupos galácticos, se mantienen unidos, no aumentan de tamaño, no se expanden. Huyen unos de otros como objetos enteros.

Dudas sobre el movimiento de recesión

Desde que se descubrió el desplazamiento hacia el rojo en los espectros de las galaxias se han expresado dudas sobre si debe interpretarse como signo auténtico de un movimiento de recesión. De hecho se observa únicamente un desplazamiento de las líneas de Fraunhofer y no el movimiento en sí. No hay ninguna indicación más de que el Universo se expande. Todos nuestros argumentos sobre una expansión han de basarse en la interpretación del efecto Doppler. Se han llevado a cabo muchos intentos para dar otra explicación al desplazamiento hacia el rojo. He aquí un ejemplo.

¿Se «cansa» quizá la luz en su largo camino hacia nosotros, pierde energía y se vuelve así más roja? Si queremos vivir con esta hipótesis tenemos que suponer que una de las leyes más fundamentales de la naturaleza no es válida de modo estricto: la ley de la conservación de la energía. Hay que preguntarse entonces por qué se ha visto confirmada de modo tan estricto en los demás casos. ¿Quizá la energía no se pierde en realidad sino que se conserva de alguna otra forma? Probablemente el espacio entre las galaxias no está del todo vacío y quizá los cuantos de luz en su camino hacia nosotros chocan con partículas, quizá con electrones, les dan cada vez un ligero golpecito y luego continúan volando con una energía algo disminuida, es decir, con una longitud de onda algo más larga, desplazada hacia el rojo. La energía se ocultaría entonces en la velocidad de los electrones, que habría aumentado algo después del choque. Los cuantos de luz continuarían con menos energía y la ley de conservación de la energía no sería conculcada.

Los experimentos han permitido conocer bastante bien el proceso de colisión de un cuanto de luz con una partícula, por ejemplo un electrón. Se sabe que el cuanto de luz no sólo pierde energía, sino que el choque lo desvía algo de su dirección original. Y aquí se presenta la dificultad: un cuanto de luz procedente de una galaxia lejana debería chocar muy a menudo con un electrón para perder una parte considerable de su energía. En cada choque cambiaría un poco de dirección. Al final debería quedar tan desviado que le veríamos acercarse a nosotros

desde una dirección distinta de la original. Todos los cuantos de luz que nos llegan de una galaxia deberían alcanzarnos desde un dominio mayor y la galaxia debería parecer difuminada formando una mancha ancha en el cielo. Pero esto no sucede. Aunque la galaxia muestre en el cielo una imagen variable vemos con perfecta definición la luz de todas las supernovas que explotan en ella. Los electrones no la han desviado notablemente, por lo tanto no pueden haber tomado energía de sus cuantos de luz.

Hasta ahora han fallado todos los intentos por dar al desplazamiento cósmico hacia el rojo otras explicaciones, aunque lo hayan intentado físicos de gran renombre como Max Born (1882-1970).

Sin embargo, los astrónomos continúan dando huesos que roer a sus colegas creyentes en la recesión de las nebulosas espirales. Se han encontrado por ejemplo en las fotografías pares galácticos que parecen relacionados. Ambas manchas nebulares parecen estar unidas en la placa por una pasarela de débil brillo. En cambio las dos galaxias tienen desplazamientos hacia el rojo completamente distintos, y según la interpretación del efecto Doppler por la ley de Hubble están separadas a gran distancia y no pueden tener ninguna relación. ¿Qué son entonces los puentes luminosos observados entre ellas?

El astrofísico Geoffrey Burbidge expresó la opinión de que quizás al interpretar el desplazamiento hacia el rojo de un modo distinto al normal toparemos con una ley de la naturaleza totalmente nueva. Sin duda sería interesante que fuera así, y que los astrofísicos pudiéramos dar una lección a los físicos que se burlan de nosotros por la vieja falta cometida al determinar la distancia de las galaxias. Pero hasta ahora no hay indicación auténtica de que el desplazamiento se deba a algo distinto al efecto Doppler.

¿Qué hay más allá?

Slipher en su colección de espectros galácticos de 1925 tenía uno con un desplazamiento hacia el rojo que corresponde a

una velocidad de recesión de 1.800 km/s, es decir, al 0.6% de la velocidad de la luz. Hubble y Humason tenían en su lista del año 1931 una galaxia que se alejaba de nosotros con un 6,7% de la velocidad de la luz. En 1935 Humason encontró una con un 14%, luego se descubrió un cúmulo lejano de galaxias con un 20%. En el año 1978 el récord de velocidad era de algo más de la mitad de la velocidad de la luz. Si se toma un valor de 50 para la constante de Hubble, aquel objeto debe estar a 3.000 Mpc de nosotros. La luz de aquel sistema estelar ha estado en camino diez mil millones de años hasta llegar a nuestro telescopio reflector. Cuando se puso en camino en aquel universo lejano, no existían ni el Sol ni la Tierra. Más tarde (en el capítulo 11) veremos que existen cuerpos celestes situados más lejos todavía, cuya existencia se conoció por primera vez en el año 1963.

Según la ley de Hubble, una galaxia que esté a 6.000 Mpc de distancia se aleja de nosotros exactamente a la velocidad de la luz. Pero ya no podemos captar ni siquiera las galaxias que están a menor distancia de nosotros. Nuestros instrumentos ya no pueden medir su luz, debido al enrojecimiento provocado por el efecto Doppler y debido al efecto de enrarecimiento de los cuantos de luz. Cuanto más se acercan las galaxias a la distancia crítica de 6.000 Mpc, más se debilita su luz. De las galaxias situadas a la distancia crítica ya no nos llega ni la más mínima señal, y de las que están más lejos todavía no nos llega nada. La expansión del Universo ha impuesto un límite natural a nuestra visión. Nuestra mirada no llega más allá de los 6.000 Mpc. Una esfera se cierra allí alrededor nuestro, como un horizonte, y no podemos captar nada más del Universo exterior.

¿Tiene sentido preguntarse qué aspecto presenta aquel Universo al cual no puede llegar nuestra mirada? ¿Contiene galaxias? Estas galaxias deberían alejarse de nosotros a velocidades superiores a la de la luz. ¿Está esto en contradicción con la física, que prohíbe las velocidades superiores a la de la luz?

Pero no solamente nos plantea dificultades saber hasta qué velocidades es válida la ley de Hubble. También plantea problemas de concepto saber cómo continúa el Universo allí fuera, si el espacio está lleno hasta el infinito de galaxias, se muevan

como se muevan. «En algún momento se ha de acabar», pensamos nosotros, «y si se acaba, ¿qué aspecto tiene la frontera del Universo?» Nos planteamos entonces involuntariamente saber de qué está compuesto el espacio allí fuera. Pero esto significa que queremos saber algo sobre la geometría de nuestro espacio. Como sucedió al plantearnos el problema de la infinitud del Universo, topamos ahora con ideas y conceptos poco evidentes que los matemáticos dominan pero que el no especialista no sabe cómo tratar. Afortunadamente hay un acceso más fácil a los conceptos geométricos necesarios para la descripción de la naturaleza del espacio en donde vivimos: la geometría de las superficies. Lo que en nuestro espacio tridimensional resulta difícil de concebir visualmente, en las superficies nos resulta conocido y cotidiano. Dejamos de momento el dominio de la astronomía de observación.

VII. LA EXPLOSIÓN PRIMIGENIA EN UN MUNDO PLANO

> Llamo a nuestro Universo mundo plano, no porque nosotros lo llamemos así sino para poder explicar mejor su naturaleza a ustedes, mis felices lectores, que disfrutan del privilegio de vivir en el espacio.
>
> EDWIN A. ABBOTT,
> *El mundo plano*

En nuestras consideraciones sobre la estructura del espacio cósmico topamos con algunas dificultades. No sólo sus inmensurables dimensiones escapan a nuestra capacidad de representación, sino que nuestra imaginación resulta también insuficiente cuando se nos dice que el espacio está curvado. Sin embargo, todos nosotros sabemos qué significa una superficie curvada, aunque nos sea difícil imaginar un espacio tridimensional curvado. Muchas cosas relativas a la estructura de nuestro espacio tridimensional, que los matemáticos sólo pueden demostrar mediante complicados formalismos, las veremos de modo inmediato e intuitivo considerando superficies, es decir, espacios de dos dimensiones. Las superficies nos parecen mucho más sencillas que los espacios, o dicho de otro modo: ante los mundos superficiales nos mostramos mucho más inteligentes que ante nuestro propio mundo tridimensional. Vamos a aprovechar este hecho en el presente capítulo.

El señor Meyer sueña con un mundo plano

Se había hecho nuevamente de noche y el señor Meyer estaba sentado en la butaca de su sala de estar, delante de la gran mesa, sobre cuya superficie casi vacía había quedado una pequeña moneda. Al lado estaba su tarjeta de visita. Aunque estaba muy cansado, el señor Meyer veía claramente la moneda

redonda y la cartulina rectangular. Le costaba mucho mantenerse despierto y lentamente se fue hundiendo cada vez más en su butaca. Se dio cuenta débilmente de que la moneda tomaba una forma de elipse y de que el borde de la tarjeta se convertía en un paralelogramo. Se deslizó todavía más hasta que sus ojos quedaron a la altura del tablero de la mesa. La moneda que ahora veía exactamente de canto parecía haberse transformado en una recta. También la tarjeta de visita no era ya más que una línea.

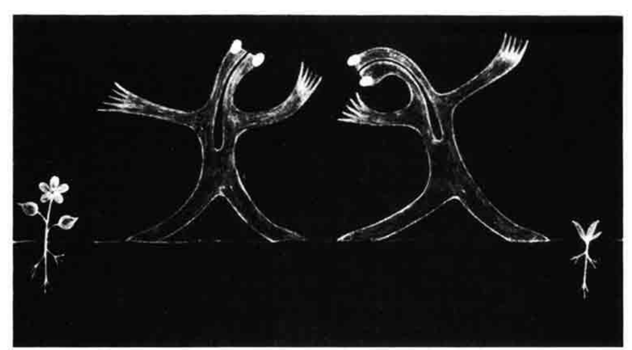


Fig. 7-1. La gente del mundo plano.

Aunque el señor Meyer estaba casi dormido, de repente le vino la idea de que quizás el plano del tablero era un universo, donde no sólo existían objetos planos, como tarjetas de visita, sino también seres vivos planos. Miró de nuevo al borde de la mesa con sus dos líneas: la moneda y la tarjeta de visita. Pero allí había además una tercera línea, y se movía. A veces parecía más larga, otras más corta, luego apartó un poco la recta de la tarjeta de visita y continuó su camino. De repente el señor Meyer tuvo la sensación de que aquella cosa móvil iba directamente a su ojo izquierdo. Su susto fue enorme.

Vio a continuación todo el panorama desde arriba, la moneda circular, el rectángulo de la tarjeta, y también el objeto móvil, que antes no estaba allí y que ahora parecía nadar en el plano de la mesa. Reconoció sus brazos, sus piernas, sus ojos. Es más plano que una chinche, pensó el señor Meyer. El tablero

de mi mesa es un mundo habitado como el nuestro. Los hombres vivimos en un Universo tridimensional. Cada objeto tiene extensión en tres direcciones: longitud anchura y altura. Ahora veo ante mí un universo bidimensional, objetos y seres que disponen únicamente de dos dimensiones, como si estuvieran comprimidos entre dos láminas de cristal. Su espacio está formado únicamente por la longitud y la anchura. Quien vive en este universo no ve sobre sí el cielo como una esfera, sino que ve un círculo cerrado a su alrededor. Los planetas no son esferas sobre cuya superficie pueda vivirse, sino discos circulares, situados en el plano y en cuyo ámbito unos seres planos encuentran su espacio vital.

Mientras tanto la habitación se había oscurecido y sin embargo parecía salir del tablero de la mesa una luz débil. Este tablero brillante parecía extenderse por toda la sala de estar, incluso atravesar sus paredes hasta el infinito... El señor Meyer vio moverse en la distancia innumerables objetos planos. Estoy contemplando aquí un universo bidimensional en toda su multiplicidad, pensó. Lo veo desde fuera, pues miro por encima de su plano y veo que la moneda es redonda y la tarjeta rectangular. El señor Meyer quería introducirse en el mundo plano, quería verlo por lo menos con sus ojos, captarlo todo como lo captaban los seres planos.

Se fue hundiendo cautelosamente en su butaca hasta que sus ojos estuvieron a ras del plano iluminado, que ahora aparecía como una línea circular brillante que rodeaba su cabeza. ¡Veo un cielo reducido a un círculo! ¡Veo el mundo tal como lo ven los seres planos!, pensó emocionado.

Entonces cayó debajo de la mesa y se despertó.

El Universo de los hombres planos

Quisiera ahora, estimado lector, introducirle en este mundo fabuloso, el mundo de los seres bidimensionales. Nosotros vivimos en un espacio de tres dimensiones. Las chinches son planas y por lo tanto casi bidimensionales. Pero también ellas se extienden en las tres dimensiones, aunque en una de ellas sólo

lo hagan un poco. En cambio nosotros podemos representamos auténticos seres bidimensionales, en un mundo plano. Están formados por átomos bidimensionales que se unen dando moléculas planas, para formar luego fibras musculares planas y glóbulos sanguíneos en forma de disco. Su cerebro plano sólo conoce los planos. Su mirada y su pensamiento están dirigidos únicamente a su plano vital, no tienen ni idea de un posible Universo exterior en el cual les sería imposible moverse.

Nuestros hombres planos viven en su planeta, que inspirándose en nuestro mundo llamaremos «tierra». Este planeta es un disco circular. Ellos viven en su contorno, del mismo modo que nosotros vivimos sobre nuestro globo terrestre. La masa de su tierra se mantiene unida gracias a la gravedad, que también sujeta el pueblo de los hombres planos a la línea que limita su disco terrestre.

Observemos más atentamente el pueblo de los hombres planos (fig. 7-1). Debido a que les falta la tercera dimensión son algo distintos de nosotros. Por ejemplo, no pueden tener un canal digestivo interior, porque dividiría inmediatamente a todos los seres en dos partes que no tendrían relación entre sí. Los hombres planos morirían. Por lo tanto, el alimento después de la digestión ha de salir por donde entró. Su boca ha de cumplir dos funciones. Esto quizás nos parezca poco apetitoso, pero sólo es cuestión de acostumbrarse, y los hombres planos no conocen ningún sistema más[9].

Un problema difícil para ellos fue moverse sobre la circunferencia de su planeta, sobre todo cuando aumentó el número de hombres planos que habitaban su planeta. Cuando querían ir de un lugar a otro se encontraban a menudo con otro hombre plano por el camino, y no podían simplemente rodearlo. «Rodear» es una cosa que no existe en el mundo plano. Tenían que

[9] Cuando hube pensado la forma del cuerpo de los hombres planos representada en la figura (hay muchas maneras posibles de idear el cuerpo de los hombres planos) se me planteó la cuestión de la vida sexual en el mundo plano. No es un problema fácil, porque casi siempre tienen un brazo o una pierna en marcha. (Cuanto más se piensa en el tema más se aprecia nuestra tercera dimensión.) Sea como sea, el sistema funciona y los hombres planos tienen hijos y se reproducen rápidamente.

subirse encima suyo o saltar. En el transcurso de su historia evolutiva fueron mejorando sus capacidades de salto hasta que finalmente consiguieron volar; de este modo se solucionó para siempre el problema de los viajes por la circunferencia de su planeta. Podían llevar a cabo largos viajes sin molestarse mutuamente, podían incluso dar la vuelta a su planeta. Claro que esto sólo fue posible porque su disco planetario está rodeado por una envoltura anular de aire. Las moléculas de aire no pueden escapar debido a la atracción de la tierra, y los hombres planos pueden respirar y volar en él (fig. 7-2).

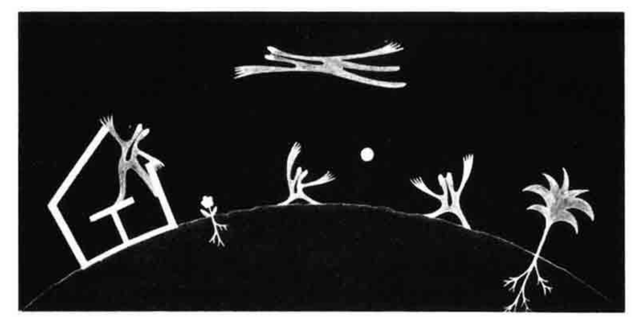


Fig. 7-2. Hombres planos sobre la circunferencia de su disco planetario.

Las primeras reflexiones sobre la vida en un Universo bidimensional son desde luego de Edwin A. Abbot (1838-1926), cuya novela *Flatland* describe un mundo plano donde viven seres con forma de figura geométrica. Luego otros aprovecharon su idea. Hoy en día al otro lado del Atlántico hay científicos, guiados por el especialista en ordenadores Alexander K. Dewdney, de Canadá, que se ocupan como hobby del mundo de los seres bidimensionales. Se ha elaborado una física de los átomos planos con un correspondiente sistema periódico de los elementos químicos, así como una técnica que va desde el grifo hasta el piano bidimensionales pasando por el motor de explosión, desde luego todo en broma. El paso de nuestro mundo tridimensional a uno bidimensional no es unívoco. Son imaginables muchos Universos de dos dimensiones que se parezcan

en sus rasgos fundamentales a nuestro Universo de tres dimensiones. El Universo de los hombres planos[10] que describo aquí, lo he escogido por una parte de modo que los seres sean parecidos al hombre, dentro de lo posible, y por otra de modo que el ejemplo de su cosmología bidimensional nos ayude a comprender de modo sencillo y visual los conceptos difíciles de nuestra cosmología. El sentido de la cosa es precisamente éste: queremos aprender algo de nuestro mundo gracias a los hombres planos.

La astronomía de un Universo plano

El disco terrestre gira alrededor de un enorme disco solar, y puesto que la tierra plana gira sobre su punto central, se hace en ella el día y la noche. Al principio los hombres planos pensaban que su disco terráqueo estaba inmóvil y que el Sol se desplazaba cada día a su alrededor. Pronto descubrieron que la tierra y algunos puntos de luz que se movían de modo extraño en el cielo y que ellos llamaron «planetas» se mueven en órbitas casi circulares alrededor del disco solar. Alrededor de la tierra gira también una luna, que naturalmente también es un disco. Puesto que la tierra, la luna y el sol están todos en la misma superficie (de lo contrario no estaríamos en un Universo plano), en cada vuelta de la luna se produce un eclipse de sol y otro de luna.

Cuando hablamos aquí de fenómenos en el cielo de los hombres planos debemos tener presente que este cielo tiene un aspecto muy distinto del nuestro. Nosotros vemos el cielo como una gran esfera en la distancia. Los hombres planos sólo ven una *línea celeste,* porque sólo pueden mirar en su plano.

Cuando un hombre plano mira al cielo después de ponerse el sol, el cielo le parece un enorme semicírculo que se extiende

---

[10] El hecho de que en nuestra época de igualdad de derechos llame *hombre*s planos a mis seres unidimensionales y no cite a las *mujeres* planas, se debe a que tengo la sensación que esta última palabra alude a algún defecto.

de un punto del horizonte al otro. En este semicírculo chisporrotean, como perlas alineadas en un collar, los puntos brillantes de luz de las estrellas, perlas de distinto brillo y color. Cuando amanece, el cielo nocturno empieza a clarear en las proximidades del punto oriental del horizonte; las estrellas se desvanecen y pronto se levanta la línea brillante del sol: empieza el día.

El movimiento del disco terrestre alrededor del disco solar hace que las estrellas cercanas que observan los hombres planos se desplacen algo en relación a las situadas a mayor distancia. Los hombres planos pueden medir *paralajes* (ver la pág. 97 y el apéndice C), y así pueden determinar las distancias a las estrellas más próximas basándose en la distancia tierra-sol, conocida desde hace tiempo. En la parte de su Universo que pudieron medir con ayuda del método de los paralajes, hay estrellas cefeidas. Los hombres planos pronto descubrieron que existe una relación entre el período y la luminosidad en este tipo de estrellas variables. Calibraron rápidamente esta relación y pudieron determinar distancias muy grandes en su Universo superficial.

Descubrieron así que todas las estrellas perceptibles como puntos individuales llenaban el espacio sólo hasta una distancia de 10 a 20 kpc. A mayor distancia parecía no haber estrellas. Los hombres planos habían descubierto su galaxia. Les costó más que a nosotros, porque su sistema no forma una banda en el cielo, como nuestra Vía Láctea. Tuvieron que descubrir la existencia de su sistema basándose únicamente en las mediciones de distancias (fig. 7-3). Puesto que las estrellas estaban más apretadas en una dirección de su círculo celeste que en las demás direcciones, llegaron a la conclusión de que ellos con su disco solar no ocupaban el punto central del sistema estelar, sino que debía buscarse el centro más bien en la dirección donde las estrellas estaban más apretadas. Descubrieron así esta característica de su galaxia que Shapley había descubierto mediante la determinación de las distancias a los cúmulos globulares.

Pronto vieron que su galaxia no era la única. Desde hada tiempo se habían fijado en la presencia en su línea celeste de

fragmentos lineales difusos. El progreso de la técnica de observación les permitió resolver estas nebulosas en estrellas individuales. Los hombres planos comprendieron que su galaxia era sólo un ejemplo más de un número incontable de Universos islas, formado cada uno por centenares de miles de millones de estrellas. Cuanto más lejos miraban los astrónomos planos en el espacio, más Universos islas aparecían. Los hombres planos comprendieron que todo lo que conocían hasta entonces, la tierra, la luna y el sol, incluso la multitud de estrellas, era una nada en comparación de aquella multitud incontable de Universos islas. Vieron brillar allí supernovas como en su propio sistema, y descubrieron cefeidas con sus cambios rítmicos de brillo que les ayudaron a determinar las distancias: el Universo isla más próximo estaba situado a menos de un millón de pc, pero la mayoría estaban situados mucho más lejos en la superficie.

Un Wilhelm Olbers plano les había señalado la paradoja que se presenta al suponer que el Universo plano está lleno desde siempre de estrellas inmóviles, de modo que mirando en cualquier dirección se acaba siempre mirando sobre la circunferencia de una estrella. En tal caso su cielo nocturno no debería ser oscuro sino extenderse de un punto del horizonte al otro como una línea brillante, tan brillante como la corta línea solar que puede verse de día.

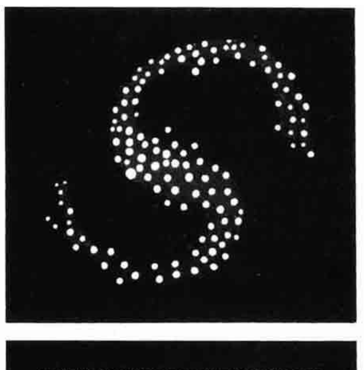


Fig. 7-3. Arriba: una galaxia del Universo plano vista desde fuera. Abajo: la misma galaxia vista por los hombres planos sobre su línea celeste.

La solución de la paradoja vino cuando los hombres planos tuvieron su Hubble, el cual con ayuda del efecto Doppler determinó que el Universo en su conjunto se expande. Cuanto más lejos esté una galaxia del Sistema Solar de los hombres planos, o lo que es prácticamente lo mismo, cuanto más lejos esté de la galaxia natal de los hombres planos, con mayor velocidad se alejará. El enrojecimiento de la luz y el efecto de enrarecimiento debilitan algo la luz de las galaxias alejadas. Sin embargo, si miran a grandes distancias en su Universo, los hombres planos estarán viendo el pasado cuando todavía no había estrellas. Por este motivo su cielo nocturno es oscuro y no está completamente cubierto de estrellas.

A partir de la distancia y la velocidad de las galaxias pudieron calcular el inicio del Universo. Obtuvieron un momento situado unos 15.000 millones de años en el pasado, y llegaron a la conclusión de que antes de aquel tiempo todas las galaxias, de hecho toda la materia de su Universo plano, estaban apretadas con una densidad enorme. Una gran explosión lo proyectó todo en todas direcciones, y el impulso fue tan grande que todavía hoy las galaxias del mundo plano continúan separándose unas de otras. Los hombres planos habían descubierto la gran explosión primigenia, pero todavía no la habían comprendido, ni mucho menos.

La geometría en el mundo plano

Los hombres planos veían su Universo hasta donde llegaban sus telescopios lleno de galaxias. Como es lógico, las más alejadas aparecían débiles, por el debilitamiento provocado por su movimiento de fuga. Pero cuando construyeron nuevos telescopios más potentes pudieron observar regiones más alejadas de su Universo superficial. Descubrieron que, en las regiones que acababan de abrir a la observación, su Universo superficial tenía exactamente el mismo aspecto que su propia vecindad. Por aburrido que pudiera parecer el Universo en su conjunto, los hombres planos continuaban preocupados por un

tema: qué había allá fuera. ¿Tenía quizás el Universo algún final?

Los matemáticos eran los hombres planos que habían dedicado los pensamientos más importantes y profundos a este tema. Pero la mayoría de hombres planos no sabían en qué se ocupaban sus matemáticos planos porque a estos últimos les resultaba difícil hacer comprensibles sus pensamientos a los demás, tan profundos eran, y porque sus resultados, en el mejor de los casos, sólo los comprendían sus colegas. La dificultad principal residía en que los hombres planos estaban acostumbrados a pensar únicamente en su Universo plano. Sus concepciones se habían formado en su superficie cósmica, y para ellos no había nada fuera de su Universo. Su pensamiento no podía elevarse por encima de aquel mundo superficial.

Nosotros disfrutamos de una enorme ventaja en relación a ellos. Nuestros conceptos se han formado en un espacio tridimensional y ni somática ni mentalmente estamos ligados a un Universo superficial. En cierto modo vemos los problemas de los hombres planos desde fuera. Vemos claramente cosas para cuyo esclarecimiento los matemáticos planos necesitan fórmulas inacabables[11]. Para un hombre plano la persona más sencilla de nuestro Universo es un Einstein. Nosotros vemos el Universo plano desde fuera.

Aquí tenemos el Universo de los hombres planos, como una superficie extensa (fig. 7-4) fundamentalmente vacía, aparte de las galaxias individuales que se alejan unas de otras. El Universo plano se va enrareciendo. Nuestros hombres planos tienen una cierta idea de cómo está hecho su Universo. Han medido el espacio en sus proximidades, y para ello han desarrollado la ciencia de la geometría. Su geometría, que actualmente

[11] Escribir en un mundo plano es bastante más difícil que entre nosotros. Hay que poner en un hilo los signos punto, raya y espacio como si fuera un código Morse Luego los hilos pueden plegarse como un acordeón. Se abren como nuestros libros y el acceso a un pasaje concreto del texto es fácil. Este sistema sustituyó pronto al método original de almacenar los hilos doblándolos en espiral.

estudian en la escuela todos los hombres planos, es bidimensional, lo que en nuestro Universo llamamos *geometría euclidiana* del plano, y que también nosotros hemos estudiado en la escuela. Nos resulta más sencilla que la geometría del espacio, pero para los hombres planos ya resulta suficientemente complicada. Les cuesta comprender un triángulo. No pueden verlo nunca desde arriba, sino siempre de lado, como un trozo de recta, nunca como una superficie, del mismo modo que nosotros sólo vemos la superficie de un cuerpo opaco, no su volumen entero. Sin embargo, los hombres planos han resuelto los triángulos. Han medido las longitudes de los lados de un triángulo, han determinado los ángulos de los triángulos con ayuda de goniómetros (planos) y han observado que los ángulos de todos los triángulos suman igual, a saber 180°, sea cual fuere la forma del triángulo, acutángulo u obtusángulo.

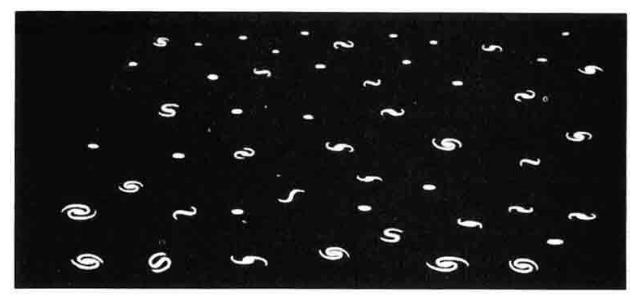


Fig. 7-4. El mundo plano como un plano con galaxias planas. Está representando aquí una porción rectangular vista desde fuera y de lado.

¿Viven pues los hombres planos en un plano, como acabamos de imaginar, puesto que en su Universo son válidas las reglas y leyes de la geometría euclidiana del plano? ¡En absoluto! Vamos a verlo en la figura 7-5. Allí está representado un Universo superficial que no es plano sino que está deformado como una chapa ondulada. ¿Qué geometría es válida en este extraño Universo?

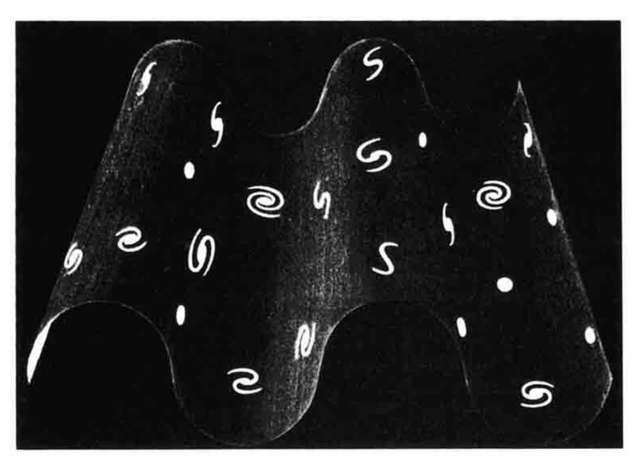


Fig. 7-5. El mundo plano como un Universo ondulado. Las galaxias con sus habitantes (planos) están en la superficie ondulada y sólo pueden moverse en ella. La luz sólo puede propagarse en esta superficie y generalmente llega al observador en líneas onduladas. Como se explica en el texto, los habitantes de este Universo no pueden distinguirlo de un Universo en un plano como el representado en la figura 7-4.

Para entenderlo mejor debemos tener bien claro que los hombres planos sólo consideran válido lo que pueden percibir, lo que influye en cierto modo en sus vidas. Puesto que no pueden elevarse por encima de su mundo, ignoran la estructura ondulada de su Universo, por lo menos no la conocen gracias a la simple visión. ¿Pero y con su geometría? ¿Pueden mediante mediciones imponer la claridad en su Universo, al estilo de los geómetras, y saber si su Universo es plano o curvado?

No, no podrán reconocer nunca la curvatura de su Universo de chapa ondulada. Para entenderlo debemos tener en cuenta que podemos enderezar el Universo de chapa ondulada y formar un Universo plano sin necesidad de romperlo. Si no estiramos ni rompemos nada, si sólo doblamos, no cambia en nada

la geometría. La suma de los ángulos de los triángulos del Universo de chapa ondulada es de 180º.[12] Aunque vistos desde fuera los lados suben y bajan siguiendo la chapa ondulada, los hombres planos de este Universo no pueden notarlo. Para ellos los lados del triángulo que suben y bajan son los más rectos que existen, y no notan nada del proceso de ondulación de la recta. En efecto, el movimiento tiene lugar en la tercera dimensión, para lo cual no están hechos. Dentro de su superficie no tiene lugar ningún movimiento. Los hombres de la chapa ondulada creen pues que su Universo es plano, no curvo. Sólo nos parece curvo a nosotros, que estamos fuera. Vamos a expresarnos con mayor precisión y llamar *curvatura interior* de una superficie la curvatura que puede descubrirse mediante mediciones llevadas a cabo exclusivamente dentro de la superficie. Los hombres planos sólo pueden descubrir las propiedades interiores de su Universo, puesto que sólo pueden llevar a cabo mediciones en su Universo. *Nosotros* podemos saber que la chapa ondulada está ondulada y no es plana porque podemos medir longitudes con una regla o porque lo apreciamos intuitivamente con los ojos, pero estas longitudes corren fuera de la superficie ondulada, están en el espacio tridimensional. Puesto que con mediciones internas no puede observarse ninguna curvatura, decimos que la curvatura interior de la superficie ondulada es nula. Y puesto que con mediciones llevadas a cabo fuera de la superficie o simplemente mirándola desde fuera podemos determinar que la superficie ondulada no es plana, decimos que

---

[12] Los lados de un triángulo son rectas. ¿Qué significa esto en un mundo curvado? Estamos acostumbrados a decir que la línea recta es la distancia más corta entre dos puntos. Esto es válido también en los universos curvados, como el de chapa ondulada. Si tengo allí tres puntos, los puedo unir con líneas que corran totalmente en su Universo, es decir, que suban y bajen con la superficie ondulada, pero que al mismo tiempo constituyan las distancias más cortas en la superficie. Los triángulos en las superficies esféricas se forman con lados que son líneas circulares curvas, los llamados *círculos máximos*. Constituyen las líneas de unión más cortas entre dos puntos de la esfera. Los pilotos vuelan siguiendo estos círculos máximos de un lugar a otro de la Tierra, para gastar la cantidad menor de combustible. Estas líneas vistas desde fuera (más exactamente: desde fuera de la superficie esférica) parecen curvas. Sin embargo, en la superficie esférica son las líneas más rectas que puedan imaginarse.

la superficie, aunque no tenga una curvatura interna, sí tiene una *curvatura externa*.

Así pues lo hombres planos no saben, y por principio no sabrán nunca, si viven en un Universo plano y liso o en un Universo curvo de chapa ondulada. Esto no les preocupa mucho porque ambos Universos son para ellos lo mismo.

Quizás estos conceptos quedarán todavía más claros con un *Universo cilíndrico*. Está representado en la figura 7-6. Aquí el mundo bidimensional es una superficie cilíndrica, como un tubo de papel fabricado enrollando un papel plano. Dibujemos un triángulo en el papel todavía plano. Puesto que al enrollarlo no lo estiramos ni lo rompemos sino que únicamente lo doblamos, todas las longitudes del triángulo se mantienen. Tampoco cambian los ángulos. En la superficie cilíndrica ya formada la geometría es la misma que en el plano: también en el cilindro es válida la geometría euclidiana del plano.

Tuvieron muchas dificultades los hombres planos cuando sus matemáticos intentaron explicarles la idea de una curvatura exterior. Pero cuando se enteraron de que para ellos era completamente indiferente vivir en un plano o en un mundo ondulado o quizás en una superficie cilíndrica, pensaron que el tema no era muy interesante y renunciaron a saber dónde vivían realmente. Pero luego los matemáticos les explicaron otra propiedad del Universo cilíndrico.

La luz en un Universo bidimensional ha de moverse siempre en esta superficie, por lo tanto puede suceder que si se emite un rayo de luz del Universo cilíndrico en la dirección correcta vuelva a su punto de partida, cosa que nosotros los tridimensionales comprendemos inmediatamente. O dicho de otro modo: un hombre plano que mire en una dirección determinada, si es la dirección correcta (en cada punto de observación el hombre plano tiene exactamente dos direcciones correctas) y si espera lo suficiente (tampoco en el mundo puede la luz ir a velocidad superior a la de la luz), podrá ver su cogote. Esto volvió a plantear grandes dificultades conceptuales a los hombres planos, porque no podían entender de ningún modo que la luz (vista desde fuera) trazara un círculo y volviera al punto de partida.



Fig. 7-6. El mundo plano como Universo cilíndrico. Los rayos de luz que capta un observador suelen llegar o bien a lo largo de una línea recta (A) o bien a lo largo de una línea espiral (B) que se enrolla alrededor del eje del cilindro. Sin embargo, hay una dirección de observación de la cual llega luz que ha dado la vuelta circularmente al eje del cilindro (C). Si el observador mira en esta dirección (o en la dirección contraria), podrá ver su propio cogote.

Los astrónomos de la tierra plana no se tomaron muy en serio los modelos mentales de los matemáticos planos. Esto no se debía a que ninguno de ellos hubiera visto con el telescopio su propio cogote; tenían argumentos más decisivos para no gustarles el universo cilíndrico. Lo entendemos mirándolo desde fuera. Si en el mundo plano se observa el Universo en todas direcciones, se captará luz procedente de distancias infinitas, y eso no sólo al mirar en la dirección paralela al eje del cilindro. También los rayos de luz que van en casi todas las demás direcciones de la superficie dan infinitas vueltas alrededor del eje del cilindro trazando espirales. Podríamos mirar al infinito en casi todas las direcciones del universo cilíndrico.

Pero hay excepciones: cada observador tiene dos «direcciones del cogote». La luz de estas direcciones no llega de infinitas lejanías de la superficie sino que ha trazado un círculo. Tiene una historia muy distinta que la luz que llega del infinito. Los astrónomos de la tierra plana afirmaban que deberían haber podido reconocer de algún modo estas dos direcciones especiales; aquellos dos puntos del cogote en el círculo celestial deberían distinguirse en algo. Pero no se había observado nada especial. Al contrario, cuanto más cuidadosamente se estudiaba el círculo celeste más claro aparecía que todos los puntos eran iguales a los demás. No parecía darse ninguna dirección privilegiada en algo. Por lo tanto, los astrónomos planos dijeron que en su Universo sólo deberían considerarse aquellas formas de superficie en que la luz procedente de una dirección determinada no tiene tras de sí una historia distinta que la luz procedente de otra dirección cualquiera. Los astrónomos afirmaron que el Universo debía ser *isótropo.* Es decir, que ninguna dirección podía ser privilegiada. Con ello el universo cilíndrico quedó difunto.

Quedaban sin embargo como posibles la superficie plana de extensión infinita, junto con otras superficies que desde fuera parecían distintas, pero que no se distinguían de las primeras por sus propiedades internas. Son superficies como el Universo de chapa ondulada, que no presentan ninguna curvatura interna. Los astrónomos planos habían pues acabado con las especulaciones de los matemáticos planos, y el Universo volvía a estar en orden, sin cogotes en el cielo. Pero los matemáticos atacaron de nuevo.

Superficies de curvatura real

Los matemáticos en sus formalismos, incomprensibles para casi todos los demás hombres planos, reconocieron que es imaginable una cantidad infinita de otros universos superficiales, y que no hay ningún motivo para considerar el mundo plano como un plano o como una superficie cualquiera equivalente al plano sin curvatura interna. De todos modos hablaba en favor

del plano el hecho de que en la tierra plana los ángulos de un triángulo suman 180°, o sea que allí tiene validez la geometría euclidiana. Esto ya lo habían enseñado y medido en la escuela los profesores planos. ¿Pero era realmente cierto? Desde el punto de vista experimental sólo se había comprobado en las clases con pequeños triángulos. En el pequeño recinto de la clase el profesor siempre tenía razón. ¿Pero era cierto con toda generalidad? Nosotros los tridimensionales podemos comprender mejor las preocupaciones de los matemáticos planos si dibujamos sobre la superficie terrestre un triángulo fijando tres puntos y uniéndolos con las líneas más cortas, por ejemplo, con cordeles dispuestos sobre la superficie terrestre. Cuando los triángulos son pequeños, por ejemplo los trazados en un campo de deportes, se comprueba fácilmente que la suma de los ángulos es 180°. Pero imaginemos un triángulo mayor; entonces la suma de los ángulos en la superficie curvada de la esfera es mayor. Lo veremos inmediatamente si un vértice del triángulo está en el Polo Norte y los otros dos están situados sobre el Ecuador (fig. 7-7).



Fig. 7-7. Un triángulo situado sobre una superficie esférica cuyos lados son las líneas más cortas entre los vértices tiene una suma angular mayor que 180 grados. Los dos ángulos sobre el ecuador son rectos y por si solos ya suman 180 grados; hay que añadir además el ángulo del Polo Norte.

Si el Universo de los hombres planos fuera una superficie esférica, los triángulos pequeños tendrían con buena aproximación la suma «correcta», pero los triángulos mayores tendrían una suma mayor. Los hombres planos tuvieron muchas dificultades en comprender esto que a nosotros nos parece muy evidente, porque no podían imaginarse fuera de su superficie. Pero

entendieron que hay Universos en los que la geometría sólo corresponde a la de la escuela en pequeños espacios. Si se construyen figuras geométricas extendidas sobre regiones más amplias, se podría notar que la superficie donde uno vive está curvada. Se trata aquí de determinar la curvatura *interna,* puesto que en los triángulos grandes la suma de los ángulos puede comprobarse sólo mediante mediciones dentro de la superficie. Por desgracia los hombres planos estaban confinados a sus planetas, sus vuelos espaciales les habían llevado sólo al disco de su luna. Por lo tanto no podían medir triángulos grandes y no sabían si vivían en un universo plano o curvado. ¿Qué superficie concreta era su Universo en el océano sin orillas de las superficies curvas imaginables?

Los astrónomos planos limitaron de nuevo las posibilidades. Como hicieron antes al argumentar contra el universo cilíndrico, aseguraron que según sus observaciones el Universo estaba formado de modo igual hasta en las distancias mayores que todavía podían observarse; que allí había las mismas galaxias y en ellas las mismas estrellas que en las proximidades de su galaxia nativa. Si su galaxia se trasladara allí, no se distinguiría de las demás en nada esencial. En definitiva el Universo estaba formado en todas partes del mismo modo, y por lo tanto su curvatura debía ser igual en todas partes.

Con este argumento, que llamaron el *principio cosmológico,* excluyeron casi todas las formas espaciales curvadas, por ejemplo la superficie de un huevo. Su curvatura interior es distinta en los dos «polos», y diferente de la curvatura del «ecuador». Si se construyen dos triángulos de igual tamaño en puntos diferentes del cascarón, la suma de los ángulos será distinta. Si se busca un trozo de superficie que encaje como un casquete en el extremo «puntiagudo», y se traslada pegado a la superficie al otro extremo del huevo, se romperá. La curvatura de la superficie del huevo no es constante. Por lo tanto, el principio cosmológico excluye esta superficie. El universo plano no puede ser una superficie de huevo.

Parece pues que aparte del plano la esfera es la única superficie que no tiene ninguna protuberancia de más. Sobre ella los ángulos de todos los triángulos de igual tamaño suman igual en

todos los lugares del Universo. Los astrónomos planos se convencieron pues de que si no vivían en un plano quizás vivían en una enorme superficie esférica, ocupada por todas las galaxias visibles y muchas más de las que probablemente no tenían ninguna noticia (fig. 7-8). Y de hecho en una región pequeña la superficie de una esfera se distingue muy poco de la de un plano. Por lo tanto, en las regiones pequeñas del Universo esférico es válida la geometría euclidiana. Pero no todo es tan sencillo. El Universo ya no es infinitamente grande como el plano. Además los rayos de luz después de dar una vuelta a la esfera regresan a su punto de partida. Los hombres planos, al mirar en cualquier dirección de su línea celeste, si esperan un tiempo suficiente han de ver por fuerza su propio cogote.

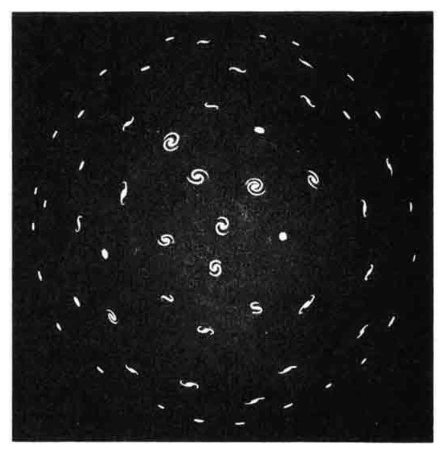


Fig. 7-8. El mundo plano como Universo esférico. Las galaxias (planas) están situadas sobre una superficie esférica. Los rayos luminosos recorren la superficie en círculos alrededor del centro de la esfera (situado fuera del mundo plano) y regresan a su punto de partida. La suma de los ángulos de los triángulos es mayor que 180 grados (ver la fig. 7-7). El espacio vital de los hombres planos en este Universo es finito. Pero no hay ningún límite donde finalice su Universo. Los hombres planos no saben nada del espacio que su Universo esférico envuelve, ni nada del espacio que envuelve su Universo.

Pero, por otro lado, el Universo esférico satisfacía todas las exigencias de los astrónomos planos. No solamente era homogéneo, sino también isótropo. No sólo el Universo ofrecía el mismo aspecto visto desde cualquier lugar, sino que visto desde un punto ofrecía el mismo aspecto en cualquier dirección. Los hombres planos conocían la recesión de las nebulosas espirales, y esto significaba que si por azar vivían realmente en una superficie esférica todo el Universo esférico se expandía y por lo tanto las galaxias se alejaban unas de otras como topos en un globo de goma al hincharse.

Así pues, la siguiente pregunta que preocupó a los hombres planos fue ésta: ¿un plano o una esfera? La esfera suponía ya grandes dificultades para sus limitadas capacidades de representación geométrica. Entonces llegaron los matemáticos con una nueva posibilidad que todavía planteó a los hombres planos dificultades mayores de representación. Incluso a nosotros, los tridimensionales nos cuesta bastante.

La esfera es una superficie con una curvatura interior constante. Un trozo de superficie adaptado a un lugar puede desplazarse sin romperse a cualquier otro lugar. En ella la suma de los ángulos de un triángulo es superior a 180°. Se dice que la esfera es una superficie de *curvatura positiva constante*. Llegaron pues los matemáticos con otra superficie. También en ella un trozo de superficie adaptado a un lugar puede desplazarse sin problemas a cualquier otro. Los triángulos pequeños tienen, como en la esfera, una suma angular aproximada de 180°, pero los triángulos grandes tienen una suma angular distinta. Esta suma no es mayor de 180°, como en la esfera, sino menos. Se dice que esta superficie tiene *curvatura negativa constante*. Por desgracia no puede representarse tan bien en nuestro espacio tridimensional como la esfera. No se ve que tenga una curvatura interna constante. Esto se debe a que en esta superficie sólo captamos la curvatura exterior y no vemos que su curvatura interior, la única que interesa a los hombres planos que viven en ella, es siempre la misma. La curvatura interna constante sólo se nota si se lleva a cabo la prueba del desplazamiento con un trozo de superficie flexible adaptada. Lo único que podemos hacer es representar en tres dimensiones

un único fragmento de esta superficie, que en realidad es infinita. Parece una silla de montar y por ello recibe el nombre de *superficie en silla de montar* (fig. 7-9). Los triángulos construidos en ella con líneas de unión de mínima longitud tienen ángulos que suman menos de 180°.

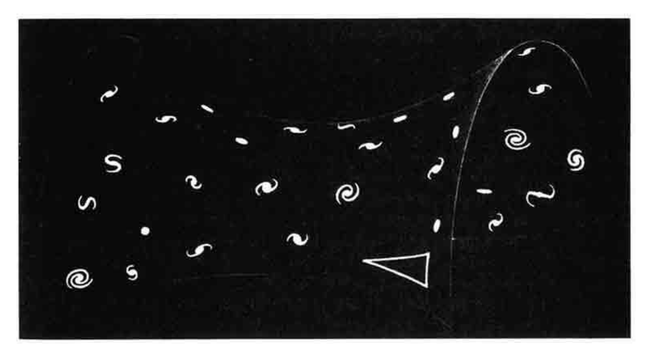


Fig. 7-9. El mundo plano como superficie en silla de montar. Aquí, a diferencia del Universo esférico, el espacio vital de los hombres planos es infinito, como el del Universo en un plano. La figura muestra solamente un trozo del Universo en silla de montar. La suma de los ángulos de un triángulo es inferior a 180°, como indica el triángulo dibujado en la esquina inferior derecha.

Si los hombres planos viven en un mundo así, el Universo les parece igual visto desde cualquier lugar (universo homogéneo), y desde cada punto el Universo ofrece el mismo aspecto en todas las direcciones (universo isótropo). La expansión continúa su curso en toda la superficie, el conjunto de la superficie en silla de montar se expande y las galaxias se alejan con ella unas de otras.

Los matemáticos no pudieron ofrecerles otras superficies de curvatura interior constante. Los hombres planos tenían pues que decidirse: ¿Plano, esfera o superficie en silla de montar? Sólo podían ofrecer una decisión los grandes triángulos, que sin embargo nadie podía medir.

¿Está curvado nuestro espacio tridimensional?

Nuestra situación no es tan distinta de la de los hombres planos. En nuestro espacio tridimensional parece ser válida la misma geometría que en la escuela, la euclidiana. La suma de los ángulos de un triángulo es 180°, como debe ser. ¿Debemos deducir de ello que vivimos en una especie de universo plano tridimensional, al igual que los hombres planos, que viven en un mundo superficial plano?

No lo sabemos. No podemos medir un gran triángulo, uno de cuyos vértices esté por ejemplo en la Tierra, el segundo en el centro de la Nebulosa de Andrómeda y el tercero quizá en una galaxia lejana. Por lo tanto, no sabemos qué valor tiene la suma de los ángulos en un triángulo tan grande. ¿Es quizá superior a los 180º? En tal caso viviríamos en un mundo que tendría curvatura positiva, como el de los hombres planos habitantes de un universo esférico. ¿O estamos en la situación de los hombres planos habitantes de la superficie en silla de montar, cuyos triángulos tienen una suma angular inferior a 180º? Nos parece difícil aceptar que nuestro espacio tenga una cierta curvatura. *¿Alrededor de qué ha de estar curvado?,* nos preguntamos, y la vista no nos ofrece ninguna respuesta. Pasa lo mismo a los hombres planos cuando tienen que imaginar que su superficie es curvada. Les falla la representación visual de la tercera dimensión, del mismo modo que a nosotros nos falta una cuarta dimensión espacial, en la cual quizá se curva nuestro espacio tridimensional. Estamos en la misma posición que los bidimensionales. Los matemáticos pueden trabajar con espacios de más dimensiones, pero nuestra capacidad de representación falla.

Cuando el gran Carl Friedrich Gauss (1777-1855) trabajaba en la triangulación de Hannover, determinó la suma de los ángulos con el mayor triángulo de que pudo disponer. Un vértice estaba en la altura de Hagen en Gotinga, el otro era Brocken y el tercero Inselsberg. No pudo descubrir ninguna desviación medible en relación a la suma de los ángulos prescrita por Euclides. Por lo tanto, no es tan sencillo determinar una posible

curvatura del espacio. Si nuestro espacio tiene alguna curvatura, desde luego no llega a estos extremos. Gauss llevó a cabo su medición sobre la superficie de la Tierra (¿dónde si no hubiera podido trabajar?), pero con ello no demostró que un triángulo formado por las líneas más cortas sobre la superficie esférica de la Tierra tiene una suma angular de más de 180°, porque esto ya lo sabía desde hacía tiempo. Escogió como vértices del triángulo montañas que le elevaban y elevaban sus aparatos de medición por encima de la superficie esférica de la Tierra, situándolo en el espacio tridimensional. Por lo tanto su medición no dijo nada sobre la curvatura interior de la superficie de la Tierra, sino sobre la curvatura interior del espacio (tridimensional) que contiene dentro suyo la Tierra.

Cuando los matemáticos hubieron investigado posibles formas espaciales curvadas, se planteó en el siglo pasado el problema de si vivíamos en un Universo plano o curvado.

Ésta es la misma situación que la de los hombres planos. Puesto que el espacio al parecer está lleno uniformemente en todas partes de galaxias y que presenta el mismo aspecto en todas las direcciones hacia donde podemos mirar, es lógico suponerlo homogéneo e isótropo, es decir, como un espacio de curvatura constante. Hay sólo tres tipos de espacios curvados tridimensionales, como en las superficies.

En primer lugar está el espacio euclídeo, que corresponde a la superficie plana. Todos los triángulos tienen, como es debido, una suma angular de 180°. Es el espacio más simple que podamos imaginar, el espacio pensado ya cuando nuestra mente no tenía idea de la posible existencia de espacios curvados.

La otra posible forma espacial corresponde al universo esférico de los hombres planos. La geometría de las grandes dimensiones es distinta: los triángulos tienen sumas angulares mayores, como sobre la superficie de una esfera. Y este espacio posee una propiedad más: es finito. Del mismo modo que la superficie de una esfera tiene un número finito de metros cuadrados, también el espacio de curvatura positiva tiene un número finito de metros cúbicos. Si me muevo dentro de él en la misma dirección volveré al final a mi punto de partida, del

mismo modo que un avión puede regresar a su punto de partida sin que el piloto tenga que dar ningún viraje. Esto ha de ser válido también en nuestro espacio de curvatura positiva para los rayos de luz. Por lo tanto, si miro en una determinada dirección durante un tiempo suficiente es posible que vea en las profundidades del espacio mi propio cogote. Hermann von Helmholtz (1821-1894) señaló ya esta posibilidad con un guiño divertido de ojos. Si vivimos en un espacio de curvatura positiva constante, el volumen de que disponemos es finito. No podemos salir de este universo finito, del mismo modo que los hombres planos no pueden escapar de su superficie esférica. Decimos que vivimos en un *universo cerrado*.

Otra posibilidad mental para nuestro mundo tridimensional corresponde al Universo en silla de montar de los hombres planos. Tampoco en este caso es euclidiana la geometría. Los triángulos grandes tienen una suma inferior a los 180° Sin embargo, este Universo no es cerrado. Quien se pone en marcha en una dirección dada no regresa, igual que quien hace lo mismo en una superficie en silla de montar. Puesto que el volumen del espacio cósmico es infinitamente grande, decimos que este Universo es *abierto*.

¿En qué mundo vivimos pues? Hasta ahora no hemos podido saberlo. Veremos en páginas siguientes cómo se intenta responder a esta pregunta importante para nuestras ideas sobre el Universo.

Fantasmas de la cuarta dimensión

Las ideas sobre una cuarta dimensión estuvieron muy difundidas en el siglo pasado. Nosotros, vistos desde la cuarta dimensión desempeñamos quizás el mismo triste papel que los hombres planos pueden representar ante nosotros, los tridimensionales. Voy a citar aquí al astrofísico de Leipzig Friedrich Zöllner (1834-1882). Le debemos contribuciones importantes a la astrofísica. Es conocido todavía hoy su aparato para la determinación del brillo estelar en el cielo, el fotómetro de Zöll-

ner. Fue el primero en plantearse la posibilidad de que estuviéramos en un Universo de curvatura positiva, correspondiente al Universo esférico de los hombres planos. Pero no solamente vivió una época en la que la astrofísica abría una nueva puerta a las estrellas gracias a la introducción del análisis espectral. Fue también la época en la que el físico y químico sir William Crookes produjo en Inglaterra con su tubo de descarga gaseosa notables fenómenos luminosos. En los tubos atravesados por la corriente brillaban apariciones fantasmales. Él no podía entender lo que veían sus ojos. En aquella misma época existía también un interés por el espiritismo. Zöllner fue de las personas que intentaron comprobar científicamente los fenómenos espiritistas. Fue un precursor de nuestra actual parapsicología.

Cito este hecho aquí porque Zöllner creía que muchos hechos inexplicables, como los fenómenos luminosos de Crookes, la desaparición de objetos en recipientes cerrados o el desenredo de cuerdas anudadas, que todavía hoy practican los prestidigitadores, pasaban por la cuarta dimensión. Desde la tercera dimensión podemos sacar un preso plano del interior de su prisión rectangular y dejarlo fuera de ella, sin hacerle pasar por la puerta de la prisión. Zöllner creía que del mismo modo los seres cuatridimensionales podían sacar objetos de recipientes cerrados o abrir en la cuarta dimensión nudos que no podían desatarse en el espacio tridimensional.

Con ello se ganó duros ataques. Le reprocharon falta de seriedad y su prestigio científico salió malparado. Pronto pareció que el mundo hubiese olvidado que Zöllner se merecía su agradecimiento por sus trabajos astronómicos tan importantes, que servirían de base para nuevas generaciones de científicos. Me da una cierta satisfacción comprobar que el paso del tiempo ha hecho olvidar a muchos de sus antiguos contrincantes. En cambio todos los astrónomos conocen actualmente el nombre de Zöllner, a pesar de sus fútiles intentos de tratar con métodos científicos los fenómenos ocultos.

Después de ver que podemos vivir en formas espaciales muy distintas, por ejemplo en universos esféricos o de silla de montar, que antes no habíamos quizás imaginado, se plantea

saber en qué Universo vivimos realmente. ¿Hay alguna posibilidad de decidir si vivimos en un Universo abierto o cerrado? Compartimos este problema con nuestros hermanos bidimensionales. Como veremos, la respuesta está estrechamente relacionada con el movimiento de expansión del Universo descubierto por Hubble.

VIII. EL IMPULSO PRIMIGENIO Y LA GRAVEDAD

> Sucedió en un curso después de la I Guerra Mundial que en la pizarra que contenía los anuncios de clase del observatorio de Munich en Bogenhausen apareció una referencia a los ejercicios que dirigía el director Hugo von Seeliger: «Ejercicios sobre la estructura del Universo», con la aclaración: «Sólo para avanzados.»
>
> «¡Gracias a Dios!», escribió al día siguiente un estudiante debajo de la nota.

Podemos abandonar con la mente nuestra Tierra, volar más allá del Sistema Solar y de la Vía Láctea y pensar sobre el Universo en su conjunto. Pero siempre tenemos que aceptar el hecho de que nuestros cuerpos están pegados a la superficie terrestre y de que sólo podemos contemplar el Universo desde ella o desde sus inmediatas proximidades. De hecho, ante esta situación imposible deberíamos dejar las armas con las que intentamos conquistar por lo menos mentalmente la grandeza inmensurable del Universo. Pero el deseo de meditar sobre el Universo es irreprimible. Y así buscamos medios que puedan ayudarnos a progresar, a pesar de nuestra desventajosa situación de partida. Lo que nos lleva más lejos es la creencia de que el Universo, en todo su conjunto y a grandes rasgos, es igual a lo que vemos cerca de nosotros. Este es el principio cosmológico.

El Universo es igual aquí que en todas partes

Sin el principio cosmológico son imaginables muchas formas para las superficies donde viven los hombres planos. Estas formas podrían parecernos a nosotros, los tridimensionales, como las superficies onduladas de un desierto de arena, con sus

dunas, o como los Alpes o como la superficie de un enorme animal de goma hinchado. Sería también imaginable que los hombres planos viviesen en una superficie cósmica constituida hasta donde alcanzara su mirada por un plano, pero que a gran distancia, en regiones a las que los hombres planos no tendrían ningún acceso, subiera formando montaña. Los hombres planos han decidido excluir estos Universos, porque suponen que el suyo es igual en todas partes. Este es su principio cosmológico. Ellos creen que la curvatura interior de su superficie es en todas partes la misma. Tienen buenos motivos para ello. En primer lugar miren donde miren observan que su Universo es siempre del mismo tipo. Esto significa que su Universo les parece isótropo. Pero hay más: por lejos que miren siempre ven galaxias del mismo tipo. Parece como si su Universo superficial tuviera igual constitución en todas partes. Esto les da la agradable sensación de que en su Universo no hay ningún lugar privilegiado, de que no han nacido en un lugar preferido. Cuando digo que ésta es una sensación agradable, me refiero a que un tal Universo resulta satisfactorio filosóficamente para los hombres planos. Después de que un Copérnico del mundo plano les enseñó que no estaban en el centro de su Sistema Solar, y de que su Shapley les dijo que su patria no estaba tampoco en el centro de su galaxia, no esperan ya que el creador les haya situado en el centro del Universo ni en algún otro lugar notable. Los hombres planos suponen que su Universo es homogéneo. Pero en tal caso la curvatura interior de su superficie cósmica debe ser la misma en todas partes.

De este modo la idea que tienen del Universo los hombres planos ha quedado simplificada de modo esencial. El número de posibles formas de su superficie cósmica se ha reducido drásticamente. Sólo quedan planos, esferas y sillas de montar. Aunque esta simplificación sea muy agradable para los hombres planos, por desgracia no es concluyente. Cierto que ellos han observado la isotropía de su Universo, pero su homogeneidad sólo la suponen. Es como si los holandeses decidieran que en la Tierra no hay ninguna montaña alta, porque de lo contrario vivirían en un lugar del globo especialmente destacado, a saber un lugar donde no hay montañas.

Digámoslo de nuevo para que quede claro: *isótropo* significa que el Universo ofrece el mismo aspecto a los hombres planos sea cual fuere la dirección hacia la cual miren desde su planeta. Su Universo es *homogéneo* cuando presenta la misma constitución en todos los lugares, incluso en los que están más alejados, por ejemplo cuando tiene en todas partes la misma curvatura interior. Pero del hecho de que el Universo aparezca isótropo desde un punto de observación no se deduce que el Universo sea también homogéneo. Nosotros, en nuestro espacio tridimensional, tampoco debemos deducir estrictamente, al igual que los hombres planos, que nuestro Universo es homogéneo sólo porque desde nuestro punto de observación nos parece isótropo.

Cuando decimos que el Universo de los hombres planos (de modo parecido a nuestro Universo tridimensional) ofrece el mismo aspecto en cualquier dirección, nuestra afirmación no es totalmente correcta. Un hombre plano puede mirar a lo lejos en su superficie cósmica y quizá verá una galaxia cercana. Pero su mirada también puede pasar de largo y adentrarse en las lejanías de la superficie siguiendo una dirección en la que ni los telescopios más potentes muestran ningún objeto. El aspecto del Universo no es el mismo en todas las direcciones. Hay regiones de la superficie en las que no hay galaxias, y regiones desiertas, vacías, en las que apenas se ve alguna que otra galaxia. ¿Qué quieren decir, pues, con la uniformidad de su Universo? Esto significa que el Universo plano sólo es uniforme observado a gran escala. La superficie de una naranja vista bajo la lupa presenta poros y arrugas, pero vista con perspectiva parece lisa y uniforme: del mismo modo las irregularidades en la distribución de las galaxias sólo se observan en regiones relativamente pequeñas. Toda la materia llena en promedio la superficie de modo bastante uniforme, si se consideran regiones grandes. Por lo tanto, su superficie cósmica sólo tiene un aspecto uniforme en las grandes dimensiones, pero vista con mayor detenimiento presenta irregularidades. Las galaxias en regiones mayores aparecen distribuidas uniformemente sobre la superficie. Los hombres planos no saben con seguridad si los Universos lejanos que escapan a su observación son como el

suyo. Pero les tranquiliza saber que no viven en un lugar del Universo que destaca de algún modo especial.

Cuando nos preguntamos por la estructura de nuestro Universo tridimensional estamos en una situación idéntica. Observamos la isotropía del Universo con gran exactitud, como veremos más tarde en el capítulo 12. ¿Pero observamos también su homogeneidad? En el espacio hay regiones con muchas estrellas, a saber las galaxias, mientras que el espacio intermedio parece estar vacío. Más aún, las galaxias se reúnen formando cúmulos y supercúmulos galácticos, como veremos en el capítulo 9. A pesar de ello creemos que la materia llena con densidad igual espacios mayores del Universo, porque las estructuras mayores observadas llenan el Universo uniformemente. Además la ley de la expansión de Hubble tiene la propiedad de que en cada lugar del Universo se tiene la sensación de que todo se aleja del observador uniformemente en todas direcciones, como si él estuviera en el centro. En el capítulo 6 he ilustrado el fenómeno con la tarta de pasas en expansión. Por lo tanto, los observadores de distintos lugares del Universo ven el mismo movimiento de las nebulosas, y esto constituye un argumento más en favor del principio cosmológico. Hay que añadir a esto el deseo que tenemos de no habitar ningún lugar destacado del Universo, deseo que nos hace creer en la homogeneidad del Universo, a pesar de que la observación no nos proporciona pruebas estrictas al respecto. Parece razonable pues llegar a una conclusión que tampoco es concluyente: si el Universo tiene, en general y a grandes rasgos, el mismo aspecto en cualquier dirección en que miremos, también será igual en todas partes. Si aceptamos este principio todo se simplifica mucho: nuestro espacio ha de tener en todas partes la misma curvatura interna. Queda pues excluido el equivalente en tres dimensiones de superficies como las de animales de goma hinchados y superficies alpinas. Quedan sólo las tres formas espaciales, correspondientes a las tres formas de superficie: plano, esfera y silla de montar. Si el Universo sólo puede ser una de estas formas, ¿cuál es en realidad? Veremos que hasta el momento no se ha llegado a ninguna respuesta.

¿En qué Universo curvado vivimos?

La imposibilidad de recorrer grandes distancias en el Universo, de salvar por ejemplo el espacio intergaláctico, significa que no podemos recurrir a la medición de grandes triángulos. Este método no nos sirve para decidir si nuestro espacio es plano o curvado. Hay, sin embargo, otro método que podemos utilizar desde la Tierra para buscar la curvatura del espacio.

Si la geometría euclidiana escolar es la geometría correcta en el espacio, se cumple simultáneamente otra propiedad. Voy a imaginar una gran esfera alrededor de mi punto de observación. Esta esfera tiene un volumen que podemos calcular mediante una fórmula escolar. No voy a describir aquí esta fórmula en toda su magnificencia, porque no la necesitamos. Basta saber de momento que si tenemos dos esferas, la de radio doble tiene un volumen óctuple, y el volumen de la de radio triple se ha de multiplicar por veintisiete, tal como aprendimos en la escuela: el volumen es proporcional a la tercera potencia del radio. Si esta regla se cumple para grandes esferas en el espacio, debemos deducir que vivimos en un espacio no curvado. Desgraciadamente no podemos determinar el volumen de esferas realmente grandes y, por lo tanto, estamos de nuevo en el punto de partida. Pero el espacio no es vacío sino que está lleno de galaxias. Supongamos que estén distribuidas muy uniformemente en el espacio: entonces la esfera que tiene un volumen óctuple (es decir, la esfera de radio doble) debe contener también ocho veces más galaxias. Si conocemos las distancias de todas las galaxias podremos contar cuántas están más cerca que por ejemplo 500 Mpc. De este modo encontraremos el número de galaxias en una esfera de radio 500 Mpc. Contemos ahora de nuevo y tomemos todas las galaxias que estén a menos de 1.000 Mpc de distancia de nosotros. Este nuevo recuento incluirá naturalmente las galaxias más próximas que ya hemos contado antes. Pero la segunda esfera tiene un radio doble de la primera. Por lo tanto, debería contener ocho veces más galaxias. Si nuestros números dan realmente este resultado dentro de determinados márgenes de error, podemos confiar en que la geometría escolar es válida hasta distancias de 1.000 Mpc.

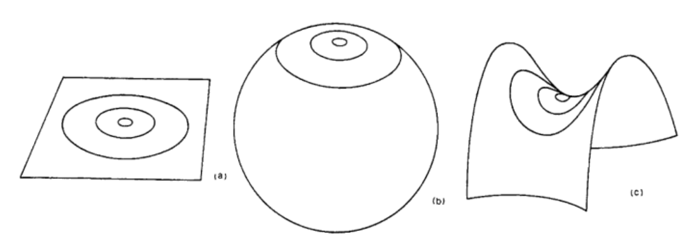


Fig. 8-1. Cuando los hombres planos cuentan las galaxias de su Universo. En un Universo en un plano (a) un radio doble da una superficie cuádruple. En una superficie de curvatura constante positiva (b, esfera) la superficie circular crece con el radio menos que en el plano. Se observa este hecho cuando se quiere ajustar un disco circular (plano) de papel a la superficie de un globo. El papel se arruga, porque sobre la superficie del globo un círculo tiene menos superficie que un círculo plano de igual radio. En una superficie de curvatura negativa constante (c, superficie en silla de montar) la superficie circular crece más con el radio que en el plano. Si se quiere ajustar un disco plano de papel sobre esta superficie, el papel se romperá porque en este Universo un círculo tiene más superficie que un círculo plano de igual radio.

Esto es más intuitivo todavía en un universo bidimensional. Los hombres planos imaginan círculos trazados en el plano alrededor de su planeta (fig. 8-1a). El círculo de radio doble tiene una superficie cuádruple y por lo tanto contiene cuatro veces más galaxias. Si los hombres planos cuentan las galaxias hasta una determinada distancia y luego hasta una distancia doble podrán comprobar si a una distancia doble corresponde un número cuádruple de galaxias, como es de esperar en un Universo plano.

¿Pero qué sucede si los hombres planos viven en una esfera cerrada, en un espacio de curvatura positiva constante? Entonces la superficie del círculo crecerá con el radio más lentamente que en el plano (fig. 8-1b). La situación es distinta en un Universo de silla de montar. En él al aumentar el radio la superficie del círculo crece más deprisa que la del círculo del plano (fig. 8-1c). Los hombres planos pueden reconocer la curvatura de su superficie cósmica contando las galaxias contenidas dentro de círculos de distintos radios.

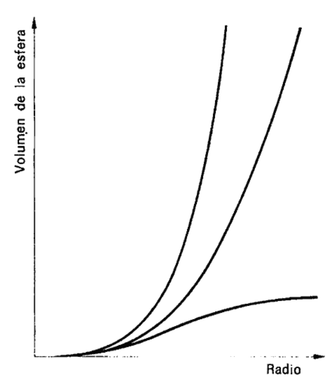


Fig. 8-2. Aumento del volumen de una esfera al aumentar el radio en distintas formas espaciales. La curva inferior da el volumen esférico en un Universo cerrado (espacio de curvatura positiva constante), la curva superior lo da para un Universo de curvatura negativa constante, equivalente al Universo en silla de montar de los hombres planos. Entre las dos está la curva que da el volumen de una esfera en un Universo plano (euclidiano) en función de distintos radios de la esfera.

Nosotros estamos en la misma situación. Contando galaxias dentro de esferas de tamaños distintos podemos decidir si vivimos en un espacio de curvatura constante positiva o negativa o si vivimos en un espacio euclidiano sin curvatura (fig. 8-2). Por desgracia hacerlo no es tan fácil. Ni siquiera conocemos con suficiente precisión las distancias de las galaxias. Sólo si se supone que todas las galaxias tienen la misma luminosidad puede deducirse la distancia a partir de la luminosidad aparente. Una galaxia a doble distancia parece cuatro veces más débil, una a triple distancia nueve veces más débil... Podemos combinar el aumento del número de galaxias con la distancia y la disminución de su luminosidad aparente con la distancia: el resultado es que el número de galaxias crece al irnos hacia valores más bajos de la luminosidad aparente. Puede calcularse para cada espacio el aumento del número de galaxias de luminosidad menor. Tomo por ejemplo una determinada luminosidad que voy a llamar *luminosidad límite* y cuento todas las galaxias cuyo brillo en el cielo es superior a este límite. Escojo luego otra

luminosidad límite y cuento de nuevo todas las galaxias más luminosas que este valor. Se obtiene por ejemplo en un espacio euclidiano una ley simple que da el número de galaxias cuya luminosidad aparente supera un determinado límite. Esta ley está representada en la figura 8-3. Así debería ser en un espacio plano.

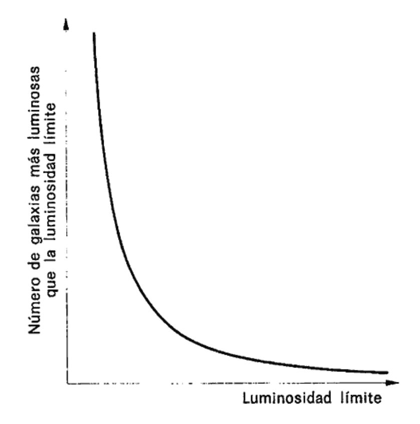


Fig. 8-3. Si todas las galaxias brillaran con igual intensidad, el número de galaxias cuya luminosidad aparente es superior a un determinado nivel de luminosidad aumentaría al reducir este nivel, porque a distancias mayores (donde las galaxias nos parecen más débiles) hay más galaxias (en el diagrama están las galaxias lejanas a la izquierda, las próximas a la derecha). El aumento que experimenta el número de galaxias aparentemente más luminosas que un determinado nivel al reducir este nivel depende del tipo de espacio en el cual vivimos. La gráfica reproduce la relación para un espacio plano (euclidiano). En principio contando el número de nebulosas podría saberse el tipo de espacio donde vivimos.

En las dos formas espaciales curvadas no sólo aumenta de modo distinto el número de galaxias al aumentar la distancia, sino que también sigue un curso distinto el debilitamiento de la luminosidad aparente. Ambos hechos juntos dan lugar a relaciones distintas entre la luminosidad límite y el número de galaxias más luminosas que este valor. Aunque las galaxias no tienen todas la misma luminosidad, las de estructura semejante

no se diferencian mucho en su potencia luminosa real. Por lo tanto, en principio puede determinarse la curvatura del espacio contando las galaxias.

Pero también aquí se presenta de nuevo una dificultad. Aunque todas fueran exactamente igual de luminosas, las galaxias toman parte en el movimiento de expansión de Hubble y por lo tanto parecen más débiles a consecuencia del efecto Doppler y del efecto de enrarecimiento. Además del debilitamiento producido por una distancia creciente tenemos también un debilitamiento debido al movimiento de recesión. Pero esto no significa el fin de las dificultades. La luz que captamos en un momento determinado ha estado en camino desde hace miles de millones de años. Las galaxias que vemos ahora en el cielo no nos dan su distribución actual, ni tampoco la distribución en un tiempo anterior. La luz procedente de distintas galaxias ha estado en camino a intervalos diferentes de tiempo, por lo tanto vemos las galaxias más lejanas en una fase más temprana que las próximas. ¿Brillaban las galaxias en su juventud con mayor o con menor luminosidad?[13] Nuestra imagen del cielo es una mezcla de cuadros pertenecientes a distintas épocas del Universo. Lo que vemos hoy está falsificado por la distancia y por el movimiento de expansión que amplifica en cada instancia la distancia. Es como si viéramos el Universo en un espejo deformante que no nos muestra su aspecto real.

Por lo tanto, si queremos saber cuál es la estructura a gran escala de nuestro espacio, tenemos que incluir en nuestras consideraciones el movimiento de expansión. El problema se vuelve, pues, un tanto más complicado.

---

[13] Cuando calculamos las distancias de objetos situados a gran distancia en el espacio dividiendo la velocidad radial por la constante actual de Hubble, es posible que cometamos un error, porque la luz de estos objetos fue emitida en una época en que la expansión del Universo quizás era distinta. Apenas sabemos nada sobre el cambio de la expansión a lo largo de la historia del Universo, por lo tanto nuestras distancias son cada vez más inseguras a medida que el objeto está más lejos. En este libro hemos supuesto un cierto retraso de la expansión compatible con las observaciones, y hemos calculado todas las distancias de modo consecuente con él a partir del desplazamiento hacia el rojo.

La explosión frenada

Cada gramo de materia ejerce una fuerza de atracción sobre las masas de su entorno: es la gravedad. La materia que está más próxima la siente con mayor intensidad, y la fuerza se debilita con la distancia. Es válida también en este caso una buena aproximación: a doble distancia, un cuarto de la gravedad... La gravedad de la Tierra nos mantiene sujetos al suelo. Cuando algo se suelta de nuestras manos cae inevitablemente hacia abajo. El Sol atrae la Tierra. Cada estrella de nuestra galaxia siente la fuerza de atracción de todas las demás. Todas las estrellas de nuestra galaxia ejercen también una fuerza de atracción sobre las de la nebulosa de Andrómeda y las estrellas de esta nebulosa ejercen una fuerza sobre las de nuestra Vía Láctea. Las galaxias se atraen mutuamente. Por mucho que disminuya la gravedad con la distancia, las fuerzas entre galaxias son enormes. La fuerza de atracción entre una galaxia situada a 1.000 Mpc de nosotros y la nuestra supera nuestra capacidad de representación terrestre. Si la comparamos con la fuerza con que la Tierra mantiene sujeta al suelo una tonelada de hierro, habría que multiplicar el peso del hierro con un número de siete cifras para obtener la fuerza con que nuestra galaxia intenta impedir vanamente el movimiento de recesión de aquella lejanísima galaxia. Las fuerzas son tan grandes a pesar de las distancias, porque las galaxias contienen mucha masa.

Por lo tanto, cuando vemos alejarse unas de otras las nebulosas espirales debemos imaginar que las fuerzas de atracción intentan retenerlas como si fueran hilos de goma tendidos entre ellas. Estas fuerzas actúan oponiéndose a la expansión general.

Si las galaxias recibieron su velocidad de recesión al principio del Universo en aquella legendaria explosión primigenia y desde entonces se están alejando unas de otras, debemos suponer que la velocidad original se ha visto frenada por la fuerza de atracción mutua entre las galaxias. Las galaxias tienen que ir más lentas. El impulso que recibió la materia universal en la explosión primera está disminuyendo.

Interviene aquí una dificultad conceptual, con la que he debido enfrentarme a menudo en las discusiones que siguen a mis

conferencias. Hemos visto que según la ley de Hubble las galaxias más lejanas se alejan de nosotros más rápidamente que las próximas. Pero esto no significa que una galaxia determinada sea más rápida si está en una región más alejada de nosotros. Cada galaxia se hace más lenta en el curso del tiempo.

Todos sabemos que la gravedad frena el movimiento. Imaginemos una piedra sobre la superficie terrestre que tiramos verticalmente hacia arriba con fuerza. La velocidad que hemos dado a nuestro proyectil al tirarlo se va reduciendo a medida que sube hacia arriba. Al final su ascenso es muy lento y luego su movimiento se invierte y la piedra vuelve a caer. Imaginemos que podemos tirar la piedra hacia arriba con más impulso de modo que su velocidad inicial sea de 11 km/s. Ningún brazo ni ningún cañón pueden impartir a un proyectil esta enorme velocidad, pero podemos imaginar el hecho mentalmente (en los cohetes espaciales se alcanza de modo progresivo un impulso de este valor). También en este caso el proyectil se va frenando, pero no vuelve a caer. Alcanza muy rápidamente grandes alturas, donde su distancia a la Tierra es muy grande y la gravedad menor que en la superficie del suelo. La acción de frenado de la gravedad ya no es tan intensa. La velocidad del proyectil disminuye, pero continúa subiendo a alturas superiores, donde la gravedad, debilitada, ya no puede invertir el movimiento. El proyectil se aleja hacia el espacio cósmico y ya no lo veremos más. El ejemplo de la piedra nos permite entender que la gravedad puede invertir la dirección de un movimiento original, si la velocidad de partida fue demasiado baja o si la fuerza de gravedad es demasiado grande. Pero también hemos visto el segundo caso: si la velocidad de partida es lo bastante alta o si la gravedad pequeña, el movimiento continúa, a pesar del efecto de frenado de la gravedad.

Lo propio es válido para las galaxias que se alejan unas de otras. Si el impulso original era lo bastante intenso o si la atracción mutua es lo bastante pequeña, las galaxias continuarán alejándose para siempre unas de otras. Pero si la explosión primigenia fue tímida o si la atracción mutua es demasiado grande, la velocidad del movimiento de expansión de las galaxias irá disminuyendo en el transcurso del tiempo, hasta que al

final el movimiento se invertirá y las galaxias se acercarán de nuevo unas a otras. Sus líneas espectrales ya no aparecen desplazadas hacia el rojo, sino hacia el azul. Finalmente se acercarán cada vez más y todo finalizará en un caldo de densidad infinita, en una poderosa implosión.

¿Cuál de estas dos posibilidades imaginables corresponde a nuestro Universo? Si le toca volver a caer podemos estar seguros de que transcurrido un tiempo después de la inversión del movimiento de recesión nuestra muerte será segura: ya ninguna expansión debilitará la luz de las galaxias lejanas, y la paradoja de Olbers se transformará en una dura realidad. Todas las galaxias contribuirán a la luminosidad del cielo nocturno, y cada punto del cielo brillará tanto como el disco solar, y con más calor. En ningún lugar del Universo, en ninguna galaxia, habrá un rinconcito frío, un nicho abrigado donde la vida pueda resistir.

Universos superficiales en expansión

Contemplemos una vez más esta totalidad en el Universo de los hombres planos, más comprensible para nosotros. No importa que la acción tenga lugar en la superficie de un plano, en la superficie de una esfera o en la de una silla de montar: las distancias entre galaxias en estas superficies aumentan continuamente. Las galaxias se alejan unas de otras en el plano, como si la superficie plana se ampliara continuamente. En la superficie esférica parece como si el radio de la esfera creciera con el tiempo, como si fuera un balón de aire hinchándose. También la superficie en silla de montar se amplía continuamente con sus galaxias. En los tres casos la gravedad de nuestras galaxias planas actúa sólo en el Universo superficial, porque fuera de la superficie no hay nada. Pero la gravedad en la superficie actúa contra la expansión, y en los tres casos podemos preguntarnos si el movimiento de expansión continúa indefinidamente o si se invierte, si al final todo volverá a caer y a juntarse.

Se trata de una cuestión de mecánica, como el caso de la piedra tirada hacia arriba, y depende también de la gravedad. Los físicos del mundo plano necesitaron mucho tiempo para comprender la gravedad. El paso decisivo lo dio un único hombre plano, el Einstein de aquel mundo, que descubrió el secreto de la gravedad en la tierra plana. ¿Cómo es posible, se preguntó, que una galaxia atraiga a otra desde una gran distancia? ¿Qué cambio ha experimentado la superficie cósmica en las proximidades de una galaxia, en la región donde se nota la acción de la gravedad, distinguiéndola de otras regiones de nuestra tierra plana situadas a gran distancia de la materia atractiva? Muchos fenómenos físicos hasta entonces incomprendidos le dieron la clave del problema. Llegó a una respuesta que hasta entonces no había sospechado ningún hombre plano. En las proximidades de una masa que emite un campo gravitatorio, ¡la superficie cósmica está curvada! ¿Qué significa esto? Imaginemos la superficie cósmica a gran escala como un plano lleno de galaxias. La superficie forma una pequeña protuberancia en el punto donde está situada cada galaxia. La superficie no sólo está abollada ligeramente en el lugar ocupado por la galaxia, sino hasta grandes distancias de ella. Introduzcamos ahora en este Universo superficial lleno de protuberancias una segunda galaxia, que también deformará la superficie: ambas abolladuras se atraerán. La gravedad no es otra cosa que la deformación de la superficie cósmica. El Einstein de la tierra plana desarrolló a partir de esto su teoría de la gravitación. Se vio que la física de las superficies deformadas podía esclarecer mejor que la teoría tradicional de la gravitación muchas observaciones donde intervenía la gravedad.

Sin embargo, de entrada la teoría de las superficies deformadas no aportó muchas novedades al campo de la cosmología. También con ella resultó que el Universo podía expandirse y contraerse de nuevo, como una piedra que sube hacia lo alto para caer otra vez. Las protuberancias no trajeron nada nuevo. El progreso esencial afectó a la forma del espacio en su totalidad.

Consideremos la materia poco después del inicio del Universo. La importancia que pueda tener luego la atracción mutua

depende de la densidad original, puesto que cuanto más junta está la materia, mayor es la gravedad. Pero también depende de la velocidad, del impulso que tiene la materia. Si este impulso es grande la gravedad no puede dominar nunca, aunque la densidad sea elevada. El destino del Universo depende de la densidad inicial y de la energía de partida. El Einstein de la tierra plana y sus sucesores descubrieron las siguientes reglas sencillas: si el impulso primigenio es demasiado pequeño (o la densidad inicial demasiado grande), de modo que al final la gravedad acabe triunfando y a la expansión del Universo superficial siga una contracción, la superficie tiene ya desde el nacimiento del Universo una curvatura positiva constante. El Universo es entonces un Universo esférico con una superficie finita.

Pero si el impulso original es grande (o la densidad demasiado pequeña), de modo que la gravedad no pueda vencer nunca, el Universo es una superficie en silla de montar, es decir, un espacio de curvatura negativa constante. En medio hay una zona de compromiso. Si la gravedad está a punto de invertir el impulso, pero sin conseguirlo, de modo que el Universo se expande cada vez con mayor lentitud, pero infinitamente, el Universo es una superficie plana.

Cuando hablamos de tres superficies de curvatura constante, se trata sólo de una aproximación. La gravedad de las galaxias, y en las galaxias la gravedad de las estrellas y de sus planetas, crean pequeñas deformaciones, por ejemplo en la superficie esférica si se trata de un Universo esférico. Estas deformaciones constituyen una especie de rugosidad en la superficie esférica, la cual, por lo demás, está curvada uniformemente.

Del mundo plano a nuestro Universo

En nuestro Universo tridimensional las galaxias se alejan unas de otras impulsadas todavía al parecer por el impulso original que recibió la materia en la gran explosión primigenia, y su atracción mutua redujo poco esta expansión. Hemos podido

comprender mejor el proceso desde que Albert Einstein en su teoría general de la relatividad nos esclareció las propiedades de la gravedad. *La gravedad es una curvatura del espacio.*

Esto se cumple tal como vimos en el Universo plano, aunque nosotros no podamos captar visualmente la curvatura. Sin embargo, el espacio no sólo está deformado en las proximidades de los cuerpos que gravitan sino que en su conjunto también puede poseer una de las tres formas espaciales antes discutidas. La teoría de la relatividad nos enseña que la intensidad del impulso original adquirido por la materia en la gran explosión determina simultáneamente la forma del espacio. Esta relación entre impulso original y forma espacial, que vamos a tratar con detenimiento, se deduce sin embargo de una forma simplificada de la teoría de la relatividad. Como veremos luego en la página 195, es también imaginable una forma de esta teoría algo más complicada, pero que también deriva de Einstein, en la cual la relación sencilla que discutimos aquí ya no es válida. Pero de momento no nos preocupemos por esto y sigamos la teoría «simple» de la relatividad general.

En esta teoría se cumple lo siguiente: si el impulso es reducido, el espacio tiene una curvatura positiva constante y su movimiento de expansión será cada vez más lento hasta que al final se invertirá y el Universo volverá de nuevo a contraerse. En cambio, si el impulso primigenio fue muy grande, el Universo continuará expandiéndose indefinidamente y su forma geométrica será la de un espacio de curvatura negativa constante. La teoría de Einstein relaciona pues dos cosas que de entrada no parece que tengan nada que ver: la *curvatura del espacio* y el curso *del movimiento de expansión.*

Este curso puede representarse gráficamente dibujando la distancia de dos partículas materiales en el Universo en momentos distintos. Así se ha hecho en la figura 8-4. En los inicios del Universo esta distancia era nula. Aumentó al principio con velocidad infinita. Luego empezó el frenado impuesto por la atracción mutua y la velocidad del movimiento disminuyó. Este frenado puede ser tan intenso que al cabo de un tiempo las partículas se dirigen de nuevo una hacia la otra. Como ya sa-

bemos, esto sucede en un espacio de curvatura positiva, es decir, en un Universo cerrado. Pero también puede aumentar continuamente la distancia de ambas partículas, y entonces el espacio tiene una curvatura negativa constante, lo que corresponde en el Universo superficial a la superficie en silla de montar. Existe el caso intermedio en que la distancia aumenta, pero este aumento es cada vez más lento y se evita por poco la contracción. Es el caso intermedio entre los dos anteriores; la curvatura del espacio es nula y el espacio es «plano».

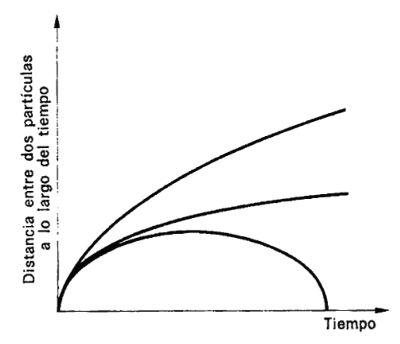


Fig. 8-4. Los tres tipos de movimiento de expansión del Universo, representados por la distancia de dos partículas materiales al aumentar el tiempo. Al principio las dos partículas están juntas y su distancia es nula. Luego se alejan una de otra, y su distancia crece. En la curva superior el impulso recibido en la gran explosión primigenia fue tan grande que las dos partículas se alejan indefinidamente. En la curva inferior el movimiento de expansión del Universo se invierte y se convierte en un movimiento de implosión. Según la teoría de la relatividad de Einstein en su forma más simple, el espacio en el caso del movimiento reproducido por la curva inferior es de curvatura positiva, correspondiente al Universo esférico de los hombres planos. El Universo es cerrado. En el caso de la curva superior el Universo es de curvatura negativa, correspondiendo al Universo en silla de montar de los hombres planos. El Universo es abierto. Entre esas dos curvas está representado el cambio de distancia de dos partículas en un Universo no curvado (plano).

Si pudiéramos pues medir la curvatura del espacio estaríamos en disposición de predecir el destino futuro de nuestro

Universo. Ya hemos visto sin embargo que la empresa es difícil. Otra posibilidad sería medir el *frenado*. Esto de entrada parece imposible, pues ¿quién puede esperar el tiempo suficiente para que el desplazamiento al rojo de la galaxia en la figura 1-2 se reduzca apreciablemente? Por fortuna no es necesario esperar, ya que podemos aprovechar el hecho de que mirando a distancia suficiente en el espacio vemos el pasado. Supongamos de entrada que la luz pudiera desplazarse con velocidad infinita: veríamos hoy todas las galaxias tal como son ahora. Observaríamos exactamente la ley de Hubble: a doble distancia, doble velocidad de expansión... Pero si tenemos en cuenta que la luz necesita un determinado tiempo para llegar hasta nosotros, cuando miramos una galaxia lejana no la vemos tal como es hoy. La vemos tal como era cuando la luz salió de ella. En un Universo con un movimiento de expansión frenado vemos las galaxias en una época en la que el Universo era todavía joven y por lo tanto se expandía con rapidez. Cuanto más lejos miremos en el espacio, las galaxias lejanas parecerá que se alejen de nosotros con una velocidad tanto más superior a la que indica la ley de Hubble con la constante actual de Hubble. Las galaxias lejanas se alejan con una ley de Hubble antigua, a la cual corresponde una constante de Hubble mayor. La figura 8-5 indica el efecto a esperar. Como vemos, hay que conocer en esta relación la distancia real que nos separa de las galaxias, y éste es el principal factor de inseguridad. Esto no es favorable a la determinación experimental del frenado.

Si no podemos medir el frenado, pero sí la constante de Hubble (que por desgracia tampoco conocemos con exactitud), la densidad de la materia en el Universo nos permitiría dar un paso adelante. Al fin y al cabo el frenado depende de la atracción mutua de las masas del Universo y ésta a su vez depende de la densidad de la materia. Los cosmólogos se simplifican la vida distribuyendo uniformemente por todo el Universo la materia que contienen las galaxias. Puesto que el espacio entre las galaxias es muy grande, el resultado de esta operación es un átomo de hidrógeno por cada 8 m^3. Por desgracia, tampoco esta cifra se conoce con mucha precisión. De lo contrario, a partir

del impulso con que se alejan actualmente unas de otras las galaxias, es decir, a partir de la constante de Hubble, y a partir de la gravedad que crea la densidad de materia, se podría calcular si el movimiento de expansión puede vencer o no. La mecánica de la teoría (simplificada) de Einstein nos proporciona en conjunto una relación matemática entre tres magnitudes: densidad de la materia en el Universo, constante de Hubble y frenado. Si conocemos dos cantidades podemos calcular la tercera. Se obtiene entonces como regalo adicional la estructura del espacio, es decir, que se sabe si el espacio es abierto o cerrado. Por desgracia no conocemos con precisión ninguna de estas magnitudes, y mucho menos dos, y no podemos determinar la tercera ni por lo tanto conocer la estructura de nuestro espacio.

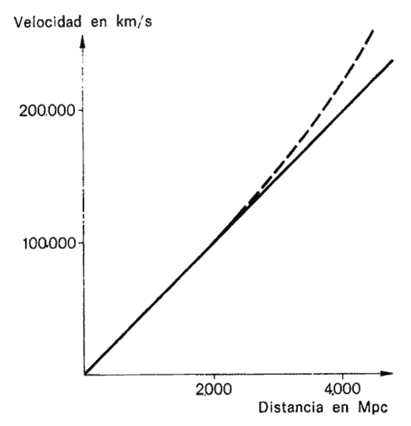


Fig. 8-5. Desviación de la ley de Hubble observable en principio. Si el número de Hubble se mantuviera constante en el tiempo, observaríamos una ley de Hubble estricta: a doble distancia, doble velocidad de recesión. Las galaxias estarían situadas todas sobre la recta dibujada. Pero ahora observamos las galaxias más lejanas en una época temprana. Si la expansión se retrasa, es decir, si la constante de Hubble disminuye con el tiempo, vemos galaxias lejanas en una época en la que la constante de Hubble era más alta. Por lo tanto, las galaxias distantes tendrán una velocidad más alta que en el caso de una expansión no frenada. Estarían quizá en la curva de trazos por encima de la recta, lo que es un signo de la variación del número de Hubble. Por desgracia carecemos todavía hoy de datos de distancias más exactos para las galaxias lejanas.

Nuestra incapacidad por medir con suficiente precisión las magnitudes para la determinación de nuestro Universo no ha de hacernos perder de vista la grandiosa posibilidad que se nos abre de conocer por lo menos en principio la estructura de nuestro espacio y en consecuencia la futura historia de la materia cósmica.

Antes de continuar quiero señalar una dificultad conceptual. Miremos para ello la figura 8-4. La figura representa la distancia de dos partículas materiales que partiendo de cero aumenta continuamente. La teoría de Einstein exige que al producirse la gran explosión primigenia todas las partículas materiales se alejen unas de otras con velocidad infinita. Esto es inquietante, a pesar de que el instante de la gran explosión sea algo tan especial y que sólo podamos pensar sobre el tiempo que siguió a ella. Lo cierto es que las partículas materiales continúan separándose a una velocidad superior a la de la luz incluso después de aquel momento. Sin embargo, sabemos por la teoría especial de la relatividad de Einstein que las velocidades que superan la velocidad de la luz están prohibidas, por lo menos esto se cree en general. Sin embargo, escuchemos de nuevo exactamente lo que dijo Einstein al respecto: si desde un punto del espacio emito una señal luminosa y envío en persecución suya un cuerpo material, será imposible dar a este cuerpo una velocidad tal que alcance la señal. Pero este principio no se conculca en el movimiento que sigue a la gran explosión.

Los hombres planos nos ayudarán de nuevo. Miremos por ejemplo la superficie esférica de la figura 7-8. En ella dos hombres planos pueden intentar alejarse uno de otro a la máxima velocidad posible, pero no alcanzarán nunca la velocidad de la luz. Ellos ya lo saben porque tuvieron también su Einstein especial. Pero si su mundo plano esférico aumenta continuamente de tamaño, como un globo hinchable, alejará de modo natural a los dos hombres planos vecinos. Si el Universo globo se hincha con velocidad suficiente, con una velocidad casi infinita, arrastrará consigo a los hombres planos con una velocidad superior a la de la luz. Ellos no se mueven mediante sus propias fuerzas, sino en cierto modo obligados por un poder superior. El hecho de que el Universo globo se expanda con

una velocidad casi infinita es un proceso que tiene lugar en el espacio tridimensional, en el cual la física bidimensional de los hombres planos no es válida. Su Einstein de la relatividad general no está pues en contradicción con el de la especial. Nosotros debemos representamos de modo igual, aunque en un espacio que tiene una dimensión de más, la velocidad superior a la luz del inicio de nuestro Universo tridimensional.

A menudo después de mis conferencias me presentan la siguiente idea: aunque la expansión del Universo no destaque ningún punto (ver la página 150), todo lo que sigue se debe a la explosión primigenia. Por lo tanto, tuvo que haber sucedido en un lugar que podríamos señalar con el dedo y decir: «aquí comienza todo». Hay que decir que esto no es cierto.

Consideremos de nuevo el Universo bidimensional de curvatura positiva constante, el Universo esférico de la figura 7-8. Al producirse la gran explosión su radio era nulo, es decir, era un punto. Luego la superficie esférica se ha ido ampliando continuamente. Las galaxias planas de este Universo plano están distribuidas uniformemente sobre la superficie esférica en expansión y se alejan continuamente unas de otras. Sin embargo, no hay en la esfera un punto especial que pueda considerarse el centro de la explosión. Si puede hablarse de un centro, sería como máximo el centro de la esfera. Pero este centro no está situado sobre la superficie esférica, por lo tanto no existe para los hombres planos ligados a su Universo plano. No pueden señalarlo con el dedo. Sucedería lo mismo si nuestro espacio tridimensional tuviera una curvatura constante positiva. Si de todos modos quiere hablarse de un centro de la explosión, este centro estaría situado fuera de nuestro Universo, en algún punto de la cuarta dimensión, sea cual fuere lo que esto significa. En todo caso, no podríamos señalarlo con el dedo.

Sería lo mismo si los hombres planos vivieran la explosión primigenia en un Universo plano o de silla de montar. Supongamos, para simplificar, una superficie plana. Al producirse la explosión primigenia toda la materia de las galaxias planas estaba en contacto. Esto significa que la materia plana estaba comprimida con densidad infinita en todos los puntos del plano. Cada centímetro cuadrado de la superficie cósmica

(plana) contenía una cantidad infinita de materia: la densidad inicial era infinita. Luego empezó todo a separarse, pero en el plano cósmico no había ningún punto especial del cual todo se alejara, sino que todo se alejaba de todos los puntos. Puede decirse lo mismo en el caso tridimensional. Al principio toda la materia estaba comprimida con una densidad infinita, pero ya entonces el Universo tenía un tamaño infinito. Luego empezó a separarse sin que existiera ningún punto central inmóvil. Ya hemos visto el fenómeno en la comparación de la tarta de pasas de la página 112. En el caso del Universo en silla de montar la situación es la misma que en el Universo plano, tanto si la dimensión del espacio es dos o tres. La explosión primigenia no crea ningún punto especial que pueda considerarse centro de la explosión. La explosión primigenia no crea ningún ombligo del Universo.

¿Repulsión gravitatoria?

Así pues, la teoría de la gravitación de Einstein nos proporciona una propiedad simple, aunque no obvia, del Universo, que puede formularse así simplificadamente: dime con qué impulso se expande el Universo y te diré si es abierto o cerrado.

Por desgracia, la cosa no es tan sencilla. Sobre nuestra comprensión de la gravitación pende amenazadora una posible complicación que se remonta ya a Einstein. Así fue la cosa. Cuando Albert Einstein hubo acabado su teoría general de la relatividad en 1915, dedicó su atención al Universo como un todo. El año era 1917, es decir, doce años antes del descubrimiento por Hubble de la expansión de las nebulosas espirales, y se esperaba que el Universo fuera razonable y reposado.

Ya antes de Einstein varios astrónomos, entre ellos Hugo von Seeliger, citado al principio de este capítulo, se habían preguntado por qué el Universo no se hundía impulsado simplemente por las fuerzas mutuas de atracción de sus masas. Se había meditado sobre el tema y se había pensado que quizá la gravitación sólo producía atracciones a pequeñas distancias de los cuerpos, pero que en las grandes distancias del Universo la

gravedad actuaba repulsivamente. Einstein creó entonces una teoría de la gravitación nueva y mejor. Pero también en ella sólo había atracción gravitatoria. La pregunta continuaba siendo: ¿Por qué no se hunde el Universo como un castillo de naipes?

El no especialista tiene a menudo una idea falsa de cómo nacen las teorías físicas modernas. Se comienza normalmente con fórmulas sencillas, que se inventan para expresar matemáticamente los resultados de las mediciones. Luego se descubre que las ideas básicas utilizadas hasta entonces ya no tienen sentido, y se mejoran. Así en la teoría especial de la relatividad de Einstein ha desempeñado un papel importante el hecho de que el concepto de «simultaneidad» no fuera claro. ¿Qué significa exactamente decir que dos acontecimientos que tienen lugar en lugares distintos son ¿simultáneos? La consecuencia de esto fue que Einstein adivinó una propiedad de la propagación de la luz, el llamado principio de la constancia de la velocidad de la luz. Einstein ideó finalmente la teoría de la relatividad especial, confirmada luego por numerosos experimentos. Cuando Einstein intentó continuar avanzando por este camino topó con problemas relacionados con el tema de la propagación de la luz en los campos gravitatorios. Llegó así a la estructura mental que llamamos teoría general de la relatividad y que nos ofrece una nueva comprensión de la gravitación. Einstein también acertó en su último paso, la formulación de las ecuaciones de campo que llevan su nombre y que coronan su teoría de la gravitación. Quiso disponer de ecuaciones lo más simples posibles que contuvieran en buena aproximación las ecuaciones conocidas hasta entonces, y en esta tarea se dejó conducir por los puntos de vista de la simplicidad y la belleza. Esto significa, expresado de modo más científico, que su formalismo debía contener ciertas propiedades de simetría. Einstein llegó varias veces a ecuaciones que le gustaban pero que luego cambiaba por otras que le gustaban todavía más. La redacción de su teoría finalizó en el año 1915. Hoy sabemos que esta teoría en sus rasgos generales es correcta, porque hizo predicciones que luego se han confirmado. Todo parecía estar en orden. Pero sus ecuaciones no proporcionaban un Universo en reposo.

No debe extrañamos que así sea. Las ecuaciones de Einstein describían la gravitación mejor que la física escolar de aquella época, pero la gravitación continuaba siendo como antes una *fuerza atractiva.* Esto significa que todas las galaxias tienen que atraerse mutuamente. Pero si nos imaginamos de entrada un Universo en el que todas las galaxias estén en reposo, todas ellas deberán moverse inmediatamente unas hacia otras impulsadas por su atracción mutua. El Universo se hundirá, a no ser que empecemos ya con un Universo en expansión. Este Universo podría expandirse indefinidamente o acabar más tarde contrayéndose. En la figura 8-4 presentamos ya estos posibles estados de movimiento. La figura no contiene ningún Universo en reposo (en tal caso la distancia entre dos partículas materiales sería siempre constante, y tendríamos en la figura 8-4 una recta horizontal). Esto no es más sorprendente que el hecho de que en la Tierra las piedras siempre vuelven a caer, sin que ninguna se quede flotando en el aire.



Fig. 8-6. Si a la atracción que obliga a caer una piedra al suelo correspondiera una repulsión que a distancias grandes entre la piedra y la superficie terrestre fuera más intensa que la fuerza de atracción, la piedra sólo caería si estuviera cerca de la superficie, pero a grandes alturas volaría hacia arriba. Entre estas dos zonas habría una determinada altitud donde la piedra quedaría flotando. Las dos regiones en las que predomina la atracción o la repulsión están dibujadas en gris oscuro y en gris claro respectivamente.

La comparación nos permite seguir a Einstein cuando buscaba un camino de salida. Supongamos que entre la Tierra y la piedra no hubiera solamente la conocida fuerza de atracción

sino que a distancias mayores se hiciera perceptible una repulsión que al aumentar la distancia piedra- Tierra acabara superando la fuerza de atracción. En tal caso sería imaginable una piedra reposando en el campo de la gravedad de la Tierra, situada exactamente a la distancia a la cual se equilibran la atracción y la repulsión (fig. 8-6).

Cuando Einstein estudió su formalismo matemático descubrió que a la atracción gravitatoria de dos cuerpos podía añadir otra fuerza, que correspondía a una repulsión gravitatoria a grandes distancias. Sus ecuaciones no perdieron por ello belleza o simetría, y apenas perdieron simplicidad. Parece incluso sorprendente, visto con perspectiva, que Einstein no hubiera descubierto inmediatamente la repulsión gravitatoria.

Si una adicional repulsión gravitatoria hace posible que una piedra flote en reposo sobre la Tierra, también Einstein descubrió que la repulsión gravitatoria le proporcionaba un Universo en reposo y cerrado. Hay que indicar sin embargo que la repulsión gravitatoria no se deduce necesariamente de la teoría de Einstein. Se adapta a la teoría, en cierto modo no molesta, pero de la teoría no se puede deducir ni que deba existir la repulsión, ni su posible intensidad. Einstein la introdujo en su teoría únicamente para disponer de un Universo en reposo que no entrara en colapso, y señaló este punto en la última frase de su trabajo de 1917.

Cuando se supo gracias a Hubble que el Universo se expandía, Einstein comprendió que no necesitaba para nada la repulsión. Al fin y al cabo la había introducido para explicar un eventual Universo en reposo. Por lo demás este Universo en reposo no tenía más valor que la piedra que se mantiene flotando en reposo entre la acción y la repulsión. Si mentalmente la acercamos un poco a la Tierra, la gravedad superará la repulsión (que sólo domina a mayores distancias) y la piedra caerá al suelo. Elevémosla algo por encima de la posición de equilibrio y la repulsión se impondrá y la impulsará hacia el espacio. Lo mismo sucede con el Universo en reposo de Einstein. Es inestable, o sea que la menor perturbación provoca su hundimiento o que se desencadene un movimiento eterno de expansión. La repulsión de Einstein (expresado científicamente, el

término cosmológico en las ecuaciones de campo de Einstein) servía pues de muy poco. No ofrecía un Universo en reposo seguro, aunque de todos modos este Universo ya no era necesario. Sin embargo, no estamos seguros de que no exista. La repulsión sólo se hace perceptible a distancias cósmicas, por lo tanto no podemos medirla en el laboratorio.

Por desgracia, la relación simple entre expansión y Universo abierto por una parte y colapso posterior y Universo cerrado por otra sólo es válida cuando no existe la repulsión de Einstein. Sin embargo es cierto, con independencia de la repulsión gravitatoria, que la densidad de la materia y la constante de Hubble determinan esencialmente la forma del espacio. Un Universo abierto se expande para siempre, aunque no haya repulsión gravitatoria, por lo tanto ésta no constituye problema. La situación puede ser diferente si la teoría sin repulsión proporciona un Universo en contracción. En tal caso la repulsión podría impedir la implosión.

Antes de continuar quisiera señalar otra posibilidad. No conocemos el valor numérico del término cosmológico, ni siquiera su signo. Por tanto, tampoco sabemos si en lugar de repulsión lo que hay más allá de las distancias cosmológicas es quizá una *atracción cosmológica* que refuerce por encima de las extensiones del Universo la conocida atracción gravitatoria. Si existe, entonces también un Universo abierto podría derrumbarse. Pero hemos partido de la repulsión cosmológica. Es importante porque posiblemente otras observaciones nos llevan a creer en una fuerza repulsiva sobre grandes distancias.

¿El huevo antes que la gallina?

En el capítulo 6 vimos que con un valor de 50 para la constante de Hubble tenemos un Universo de 20.000 millones de años. Los más antiguos cúmulos de estrellas de nuestra Vía Láctea parecen tener 16.000 millones de años de antigüedad. Así, todo estaría en orden. La determinación del valor de la constante de Hubble depende de la escala de distancias cósmica. La escuela de Vaucouleurs pretende una constante de

Hubble de valor 100 (véase pág. 119). Si el mundo se expande tan rápidamente, no puede tener más de 10.000 millones de antigüedad. Si los defensores de la expansión rápida tuvieran razón, las estrellas del cúmulo serían más antiguas que todo el Universo —el huevo anterior a la gallina que lo ha puesto. No sabemos aún cuál es el verdadero valor de la constante de Hubble. Pero, al menos con el pensamiento, deberíamos prepararnos para el último caso.

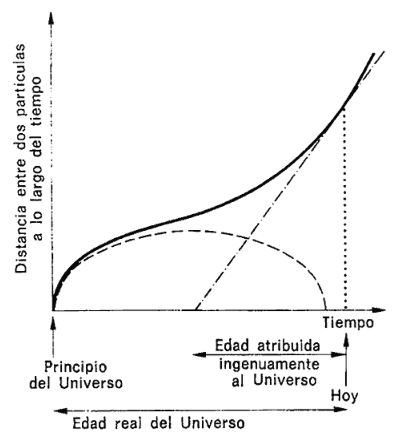


Fig. 8-7. La expansión del Universo representada por la distancia entre dos partículas materiales en el transcurso del tiempo, como en la figura 8-4; pero aquí es válida la repulsión einsteiniana. Las dos partículas procedentes de la gran explosión primigenia acabarían aproximándose de nuevo (curva de trazos) si al cabo de un tiempo no dominara la repulsión que ahora las separa para siempre. Si observamos el Universo en esta fase de la expansión tendremos la impresión de que el Universo es mucho más joven (la recta de puntos apunta hacia el inicio del Universo ingenuamente calculado). En realidad el Universo sería mucho más viejo de lo que hace suponer el movimiento actual de expansión.

La teoría de la repulsión de Einstein ofrecería una solución. El clérigo belga Georges Lemaître (1894-1966) estudió en los años treinta modelos de mundos en expansión con la teoría de Einstein sobre la repulsión gravitatoria. Uno de estos modelos

da un tipo de expansión que nos ayudaría a salir del atolladero creado por el huevo y la gallina. La figura 8-7 representa la distancia entre dos partículas materiales en el transcurso del tiempo. Al principio todo va como en las soluciones de la figura 8-4, calculadas sin repulsión. Las partículas se separan después de la gran explosión inicial. Su velocidad se reduce, porque su atracción mutua las frena. Se quedan casi en reposo. Pero luego, cuando están a suficiente distancia, empieza a tomar importancia la repulsión. Acaba dominando y todo entra de nuevo en expansión. Si nosotros nos encontramos con nuestro Universo en esta fase, la actual situación de movimiento nos da la impresión de que la explosión primigenia tuvo lugar hace poco. Nuestro error se debe a que olvidamos que en el pasado hubo un intervalo de tiempo en el cual el Universo se expandía muy lentamente, cuando la atracción y la repulsión lucharon prolongadamente entre sí.

Por lo tanto, la repulsión de Einstein podría proporcionamos un Universo en el cual las estrellas son más viejas que el intervalo de tiempo que calculamos ingenuamente a partir de la expansión actual. Pero entonces deberíamos pagar un precio. Tendríamos que creer en la repulsión de Einstein y se perdería la bella relación entre la curvatura del espacio y la expansión, según la cual los universos abiertos no pueden contraerse de nuevo y todos los cerrados acaban en una implosión. Entonces podrían existir universos cerrados en perpetua expansión y universos abiertos que acabarían contrayéndose de nuevo.

El ruso en globo y un error de cálculo de Einstein

He hablado de las posibles transformaciones imaginables del Universo, tal como aparecen en las figuras 8-4 y 8-7 y tal como se deducen de la teoría general de la relatividad, pero, aparte de Einstein, sólo he citado a Lemaître. Sin embargo, fueron varios los científicos que después del trabajo cosmológico de Einstein de 1917 se ocuparon de aplicar la nueva teoría al Universo. Los resultados representados en las figuras citadas

no se produjeron de golpe. Hay que citar por ejemplo al astrónomo holandés Willem de Sitter (1872-1935) y también al ruso Alexander Alexandrovitch Friedman. Voy a hablar aquí de este último en representación de todos los demás, en parte porque fue el primero que introdujo el movimiento en el Universo y en parte porque Einstein no siempre le trató bien.

En junio de 1922 Friedman envió a la redacción de *Zeitschrift für Physik* un manuscrito con el título «Sobre la curvatura del espacio». Esto sucedió en los primeros años de la Unión Soviética. Aquel mismo año Lenin, ya enfermo, nombró a Stalin Secretario General del Partido Comunista. Friedman todavía dijo que residía en Petersburgo. Dos años después el nombre de la ciudad se cambió a Leningrado. Einstein había descubierto cinco años antes su modelo de Universo cerrado y estático. La repulsión gravitatoria cosmológica de Einstein estaba reconocida por todos. Esta repulsión era necesaria para explicar un Universo claramente en reposo, y pasarían siete años hasta que Hubble descubriera la expansión del Universo.

Friedman descubrió entonces que existe un Universo cerrado, lleno uniformemente de materia, que se desarrolla a partir de una explosión primigenia. Primero se expande y luego se contrae de nuevo. Friedman había descubierto la curva inferior de las tres representadas en la figura 84. Dos años después descubriría el Universo abierto en expansión, o sea, la curva superior.

Friedman era originalmente matemático. Escribió su primera publicación a los 17 años. Pero pronto se interesó por la meteorología y la aviación despertó al mismo tiempo su interés. Para poder observar un eclipse de Sol en agosto de 1914 subió a un globo dirigible. Durante la guerra estuvo con la aviación rusa en el frente y estudió desde el avión el efecto de las bombas. Más tarde dirigió la navegación aérea en todos los frentes del imperio de los zares. También se le necesitó después de la revolución. En 1918 dirigió en Moscú el departamento de agrimensura aérea.

Cuando se conoció la teoría general de la relatividad, Friedman la absorbió rápidamente. En aquella época escribió el artículo antes citado. La reacción de Einstein, que no veía motivo

alguno para alejarse de un Universo estático e inmóvil, demuestra la originalidad del físico de Petersburgo. Einstein escribió una «Nota» de media página, que apareció el mismo año 1922 en *Zeitschrift für Physik.* En la primera frase ya cita el trabajo de Friedman: «Los resultados incluidos en el citado trabajo sobre un Universo no estacionario me parecen sospechosos...» Einstein al decir «no estacionario» quería decir «variable con el tiempo», es decir, un Universo distinto de su Universo estático. Einstein decía en definitiva que su Universo estático era el resultado correcto de su teoría y que Friedman había llegado a una conclusión errónea. Sin embargo, tuvo que corregirse rápidamente, y en mayo de 1923 se retractó de todo. Apareció entonces en la misma revista una «Observación», consistente ahora únicamente en siete líneas avinagradas. «En una nota anterior critiqué el citado trabajo. Sin embargo mi objeción se basaba... en un error de cálculo.» La «nota» hubiera podido contener casi dos líneas más. Hoy disponemos del manuscrito original de Einstein y sabemos que había una última frase: la solución de Friedman era correcta matemáticamente, pero no tenía sentido físico. Afortunadamente, Einstein tachó esta frase antes de que se imprimiera el manuscrito.

Friedman, a pesar de su sobresaliente contribución a la cosmología, se ocupó de modo preferente de la atmósfera terrestre. Escribió instrucciones sobre la manera de elevar con cometas instrumentos meteorológicos a las capas superiores de la atmósfera. Él mismo tripuló un globo que en julio de 1925 ganó el récord de altura con 7.400 metros y una permanencia en el aire de 10 horas y 20 minutos. Murió dos meses después de tifus, a los treinta y siete años. Desde su escritorio había demostrado teóricamente que nuestro Universo tanto puede expansionarse como contraerse, y con ello había dado una lección a Einstein en su dominio más propio. Friedman no pudo vivir el descubrimiento de la expansión del Universo.

La teoría del Universo estacionario

Después de la II Guerra Mundial, Hermann Bondi, Thomas Gold y Fred Hoyle desarrollaron en Inglaterra una teoría cosmológica totalmente distinta: un Universo en expansión sin explosión primigenia. Estos científicos parten también de la idea de que el Universo en su conjunto es homogéneo. Dondequiera que se mire se ven galaxias del mismo tipo que participan del movimiento uniforme de expansión. La homogeneidad del espacio puede expresarse también del modo siguiente: el Universo visto desde cualquier punto del espacio es en su conjunto uniforme. Hemos hablado ya del principio cosmológico. Los astrofísicos ingleses dieron un paso más. Exigieron que el Universo contemplado desde cualquier punto ofreciera también en *cualquier momento* el mismo aspecto. Llamaron a esto el *principio cosmológico perfecto.* Si este principio es cierto, tiene consecuencias decisivas para nuestro Universo.

Según nuestra observación, la materia del Universo se rarifica. La densidad media del Universo disminuye, pues las galaxias se alejan unas de otras. Pero si el Universo ha de ofrecer en todo momento el mismo aspecto, su densidad media debe permanecer constante. La materia en forma de galaxias se aleja continuamente de nosotros, por lo tanto debe crearse simultáneamente materia a partir de la nada para suministrar de nuevo la materia que se va. Podemos decir que la creación de materia a partir de la nada constituye una fuerte transgresión de nuestra física. Si se calcula con precisión, el efecto no es tan duro. Bastaría que en un litro de volumen espacial apareciera cada 500.000 millones de años un átomo de hidrógeno: con esto se podría cubrir la pérdida de materia debida a la expansión. No conocemos tanto la física como para que podamos formular objeciones contra esta mínima creación de materia. Supongamos pues de momento que la materia pueda aparecer en el espacio de la nada.

El principio según el cual el Universo debe ofrecer en cada momento el mismo aspecto tiene dos consecuencias más. La primera consecuencia afecta a la curvatura del espacio. Supongamos que nuestro espacio no es euclidiano, o sea, que tiene

una curvatura constante positiva o negativa. Esto significa que un triángulo, por ejemplo, de lados iguales entre sí y de 1 Mpc de longitud tiene una suma angular que ahora es superior o inferior a 180 grados. Supongamos además que vivimos en un Universo semejante al Universo esférico de los hombres planos. Al aumentar continuamente con el tiempo el radio esférico de este Universo cerrado y en expansión, cada porción de la superficie se hace cada vez más plana. La suma de los ángulos de nuestro triángulo se acercará cada vez más a los 180 grados. Pero esto está en contradicción con el principio cosmológico perfecto, según el cual el Universo debe tener en todo momento el mismo aspecto, es decir, que la suma de los ángulos de un triángulo de 1 Mpc debe ser siempre igual. Sólo en un Universo euclidiano es la suma angular siempre igual a 180 grados, y se mantiene así en la expansión. Por lo tanto, el principio cosmológico perfecto exige que vivamos en un Universo plano.

Sin embargo, en la teoría del Universo estacionario la fuga observada de las nebulosas espirales ha de ser compatible con el principio cosmológico perfecto. Se deduce de ello, y así llegamos a la segunda consecuencia, que la velocidad con que se alejan dos galaxias una de otra aumenta siempre, es decir, que no tenemos un *frenado* sino una *aceleración.* Para comprenderlo pensemos en dos galaxias, una situada a una distancia de 1 Mpc de nosotros, la otra a una distancia de 2 Mpc. Si damos a la constante de Hubble el valor de 50 sabemos que la primera galaxia se aleja de nosotros a 50 km/s, la segunda a 100 km/s. Esperamos ahora a que la primera se haya alejado tanto que esté a una distancia de nosotros de 2 Mpc. Ya que el Universo ha de presentar entonces el mismo aspecto que hoy, la galaxia debe alejarse de nosotros a 100 km/s, es decir, que ha de haberse acelerado. Tenemos así un Universo que se expande aceleradamente. Esto deriva del principio cosmológico perfecto. Vimos anteriormente (pág. 202) que la ley de Hubble puede conciliarse con el hecho de que la velocidad de fuga de todas las galaxias disminuya con el tiempo. Toda la expansión es entonces más lenta y la constante de Hubble se hace más pequeña. Ahora, en el Universo estacionario, la constante de Hubble no puede cambiar con el tiempo. En cambio, como ya he dicho, el

movimiento de recesión entre dos galaxias se hace siempre más rápido.

Esta es pues la imagen cósmica del Universo estacionario: se crean átomos de hidrógeno y quizá también átomos de otros elementos, los cuales forman nubes de gas en los enormes espacios de un Universo plano. Estas nubes se condensan y forman galaxias que se alejan unas de otras con un valor de la constante de Hubble válido para todas las épocas. La velocidad con que se alejan una de otra dos galaxias determinadas aumenta continuamente a lo largo del tiempo, hasta que las galaxias superan la velocidad de la luz y se pierden de vista.

Hay que destacar que la teoría del Universo estacionario no explica satisfactoriamente de dónde proviene la materia que aparece continuamente, ni de dónde salen las fuerzas que separan la materia con una velocidad creciente. La condición de partida es que el Universo debe presentar el mismo aspecto en todas partes y en todas las épocas, y se deja a la física la tarea de descubrir las leyes oportunas. Veremos luego que la observación astronómica presenta argumentos importantes contra esta teoría del Universo estacionario.

En el año 1965 la observación proporcionó una nueva indicación de que hubo realmente una gran explosión primigenia. Esto hizo impopulares todos los modelos cósmicos sin explosión primigenia. Volveremos al tema en el capítulo 12. Muchos lamentaron tener que abandonar la teoría del Universo estacionario. Los cosmólogos se acostumbraron de nuevo a vivir con la gran explosión primigenia. Para algunos esto no fue fácil. Dennis Sciama, profesor de la Universidad de Cambridge, escribió en otoño de 1967: «Debo decir que la pérdida de la teoría del Universo estacionario me ha producido mucho dolor. Esta teoría mostraba una brillantez y una belleza que al parecer el arquitecto del Universo por motivos inescrutables no ha querido apreciar. Desde luego el Universo en una chapuza...»

IX. EN EL REINO DE LAS NEBULOSAS

> La mayor acumulación de manchas nebulosas de todo el firmamento se encuentra en el *hemisferio boreal*. Se extiende la misma a través de los dos Leones, el cuerpo, la cabellera y las patas traseras de la Osa Mayor, la nariz de la Jirafa, la cola del Dragón, los dos Perros de Caza, la Cabellera de Berenice..., el pie derecho del Boyero y sobre todo la cabeza, las alas y los hombros de Virgo. Esta zona, que se ha llamado la *región nebulosa de Virgo,* contiene... 1/3 de todo el Universo nebuloso.
>
> ALEXANDER VON HUMBOLDT, *Kosmos,* 1850

Sucedió algo, sea lo que fuere, hace quizá de 15.000 millones a 20.000 millones de años, y desde entonces la materia del Universo se está expandiendo. Sabemos que la velocidad con que todo se separa de todo después de la gran explosión primigenia determina la estructura del espacio, y por lo tanto decide si nuestro Universo es cerrado o no. Pero, ¿qué significa que la materia en expansión no llene uniformemente el espacio, sino que lo haga en forma de grumos, que llamamos galaxias? Todo el espacio está casi vacío: la materia está concentrada en forma de nebulosas espirales que se mueven a través del espacio como copos de nieve. Entre ellos parece que no hay nada, o por lo menos nada que nosotros podamos reconocer claramente. ¿Por qué se ha acumulado la materia en forma de galaxias?

También cuando observamos el interior de un sistema estelar vemos principalmente un espacio vacío, mientras que la mayor parte de la materia está concentrada en las estrellas. La materia, sea cual fuere su origen en la gran explosión, está ahora reunida principalmente en las estrellas, las cuales a su vez están agrupadas formando unidades mayores, las galaxias, mientras el espacio aparece casi vacío. ¿Cómo se llegó a esta situación?

Pensamos hoy en día que sabemos más o menos cómo se transformó en estrellas la materia de las galaxias. En algunos

lugares de la Vía Láctea podemos observar el proceso de formación estelar. Masas extensas de gas y de polvo empiezan de repente a contraerse y aumentan cada vez más de densidad, impulsadas por la gravedad de la concentración de material que se forma. Regiones parciales de las nubes en contracción crean nuevas nubes parciales que se contraen hasta que finalmente nace un enjambre entero de estrellas. Cuando el señor Meyer vio en el capítulo 3 la Vía Láctea en tiempo acelerado, se sorprendió de que las estrellas no nacieran uniformemente en todo el disco galáctico sino que lo hicieran principalmente en los brazos espirales. De hecho los brazos de las nebulosas espirales sólo destacaban en las fotografías porque en ellas brillan estrellas jóvenes recién nacidas.

¿No sería de esperar que las galaxias nacieran de la materia procedente de la gran explosión primigenia mediante un proceso semejante a la formación de estrellas en las galaxias? Cuando al principio la materia llenaba quizás el Universo con una cierta uniformidad es posible que oscilaciones casuales de densidad intentaran atraer la materia vecina reforzándose a sí mismas en el proceso. De este modo pudieron formarse nubes de gas que impulsadas por su propia gravedad continuaron condensándose hasta formar galaxias. Tras un cierto tiempo toda la materia estaba concentrada en galaxias, a partir de las cuales se formaron las estrellas. La materia original de la gran explosión huía en todas direcciones, y las galaxias después de su formación también continuaron alejándose unas de otras. Su fuerza de atracción mutua no ha podido hasta hoy disminuir de modo apreciable el movimiento de expansión.

Dentro de una galaxia, la atracción gravitatoria mutua de las estrellas basta para impedir que éstas escapen. En las galaxias el impulso de la explosión primigenia que intenta separar la materia está dominado por la atracción mutua de las estrellas. Las galaxias no crecen siguiendo la expansión del Universo.

¿Permite la existencia de las galaxias conocer algo sobre aquella época temprana en la cual se formaron los primeros copos a partir de una masa de gas que llenaba el espacio con toda uniformidad, copos que se convirtieron luego en las nebulosas

espirales? ¿En qué momento de la historia del Universo ocurrió esto? Sabemos por la radiactividad de la corteza terrestre que nuestro planeta tiene unos cuatro mil millones de años, y el Sol no es mucho más viejo. En la Vía Láctea hay cúmulos estelares que tienen 16.000 millones de años (ver la pág. 119). Por lo tanto, nuestra galaxia debe tener por lo menos esta edad. La fuga de las galaxias obliga a pensar que la gran explosión tuvo lugar hace de 15.000 millones a 20.000 millones de años. Por lo tanto, las primeras estrellas y cúmulos estelares tuvieron que nacer en una época muy temprana, después de la formación en estas esferas gaseosas de copos de materia de la gran explosión con la masa de galaxias.

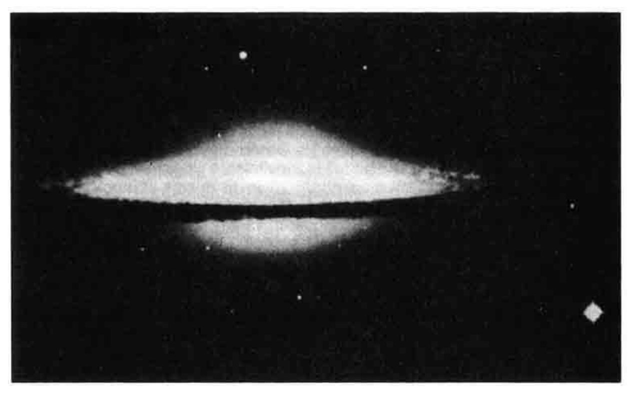


Fig. 9-1. La galaxia Sombrero en la constelación de Virgo destaca especialmente por su oscura banda ecuatorial, debida a masas de polvo absorbente. Es bastante más pequeña que nuestra galaxia Vía Láctea, pues su diámetro es de sólo 8 kpc. (Fotografía: S. Laustsen, Observatorio Europeo Austral.)

La rotación de las galaxias

Poco después de que Slipher hubiera medido en el Observatorio de Flagstaff, en Arizona, la velocidad radial de la nebulosa de Andrómeda, descubrió que una galaxia, llamada «Sombrero» por su aspecto y que se aleja de nosotros con una

velocidad de 1.000 km/s (fig. 9-1), no posee una velocidad radial unitaria. Un lado parece que se aleja de nosotros más rápidamente que el otro. Slipher dedujo de ello que esta galaxia giraba alrededor de su eje. Si una galaxia se aleja de nosotros y al mismo tiempo gira, a consecuencia del movimiento de rotación unas partes se alejan de nosotros más rápidamente que otras (Fig. 9-2). Parece ser que los movimientos de rotación en muchas galaxias desempeñan un papel importante. También gira nuestra galaxia, como vimos en el capítulo 3 en tiempo acelerado.

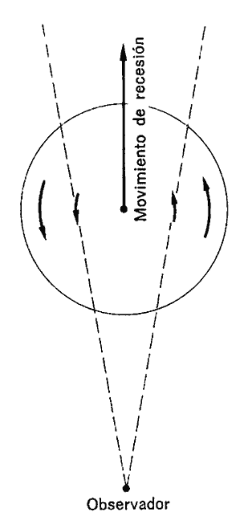


Fig. 9-2. Un observador ve de lado una galaxia que se aleja de él (como en la fig. 1-4). Sólo puede reconocer el movimiento por el efecto Doppler y entonces comprueba que una mitad de la galaxia (en la figura la mitad de la derecha) se aleja de él con mayor velocidad radial, porque allí el movimiento de recesión y el de rotación apuntan en la misma dirección. La otra mitad (a la izquierda en el dibujo) le presenta una velocidad radial inferior, porque el movimiento de recesión y el de rotación se oponen mutuamente.

El Sol se mueve con las estrellas del disco alrededor del centro de la Vía Láctea. La duración de una vuelta es de unos 250 millones de años. Este movimiento de rotación sigue un curso tal que se mantienen exactamente en equilibrio dos fuerzas, como en el movimiento de los planetas alrededor del Sol: la fuerza centrífuga que intenta proyectar todas las estrellas hacia fuera, hacia el borde del disco galáctico, y la fuerza de la gravedad que intenta atraerlas hacia el centro de la Vía Láctea. Puede utilizarse este equilibrio entre fuerza centrífuga y gravedad para evaluar la masa de la Vía Láctea. Conocemos la dis-

tancia del Sol al centro, unos 10 kpc, por lo tanto podemos determinar la fuerza centrífuga a partir de la velocidad de giro del Sol alrededor del centro. Podemos luego preguntamos qué masa debe atraer al Sol en dirección al centro para obligarle a seguir su órbita a pesar de la fuerza centrífuga. Este cálculo, aproximado, pues el valor exacto depende de la distribución de la masa en el espacio, da de 100.000 millones a 200.000 millones de masas solares.

Pueden determinarse también las masas de otras galaxias aplicando este principio y un método algo mejorado. Supongamos que vemos una galaxia de lado, más o menos como la de la figura 1-4. Si determinamos su velocidad de fuga con el efecto Doppler, la ley de Hubble nos dará la distancia. Si tomamos ahora espectros de la galaxia a ambos lados del centro y medimos el desplazamiento hacia el rojo de las líneas espectrales, obtendremos velocidades radiales algo distintas y podremos deducir de ellas el movimiento de rotación de la galaxia. Entonces podremos calcular la fuerza centrífuga a una determinada distancia del centro. Luego se calcula la atracción gravitatoria que equilibra esta fuerza centrífuga. Llegamos así a conocer aproximadamente las masas de otras galaxias. Parece que en la mayoría de los casos una galaxia contiene de diez mil millones a unos cuantos centenares de miles de millones de estrellas de masa solar. En la nebulosa de Andrómeda hay unos 400.000 millones de masas solares.

¿Por qué giran las galaxias? ¿Qué ha puesto en movimiento estas ruedas brillantes que se alejan unas de otras? Parece como si las galaxias distribuidas por el espacio no tengan ninguna dirección preferida para sus ejes de rotación. Sabemos que un cuerpo dejado a sí mismo, ni puede empezar a girar de la nada, ni, si giraba desde el principio, pierde su impulso giratorio sin más. Si queremos expresarnos con algo más de precisión y utilizar el lenguaje de nuestro profesor de física diremos: un cuerpo no perturbado conserva su momento angular. Las galaxias tienen momento angular. Por lo tanto, debieron recibirlo al principio; es un momento angular de la época temprana del Universo. ¿Qué puso entonces en movimiento giratorio la materia del Universo? ¿Qué le dio impulso?

Probablemente el hecho de que las galaxias giren no implica ningún profundo misterio. Basta suponer que la materia a partir de la cual se formaron las galaxias estaba en un estado irregular de movimiento que se sobrepuso al movimiento de expansión. Cuando en esta masa en movimiento se segregaron partes para condensarse y formar galaxias, el movimiento de cada masa parcial recibió algo de momento angular. Supongamos para imaginarlo mejor el movimiento irregular del agua en un torrente de montaña, y saquemos un vaso de esta agua. Al principio el agua del vaso continuará reflejando el movimiento turbulento del torrente, pero pronto la fricción frenará los movimientos rápidos y de pequeñas dimensiones. Al cabo de un tiempo el líquido del vaso sólo mostrará un movimiento de rotación. Con el agua hemos recogido también momento angular. Si repetimos el experimento se repite el fenómeno, pero puede suceder que al final la rotación residual tenga un sentido contrario al del primer intento. La cantidad de agua recogida tiene ahora otro momento angular. La rotación de las galaxias indica que la materia a partir de la cual nacieron no sólo se expandía en aquel momento sino que además se movía con turbulencia.

Vimos antes que la rotación constituye un medio importante para evaluar las masas de las galaxias, pero debemos aclarar que no es el *único* medio. Hay galaxias tan próximas que la fuerza mutua de atracción las mantiene unidas. No se alejan como lo ordena la ley de Hubble. Giran una alrededor de la otra como un par estelar de nuestra galaxia, y se alejan conjuntamente de nosotros. El efecto Doppler permite medir su velocidad de giro alrededor del centro común de gravedad, por lo tanto su masa puede obtenerse de nuevo a partir de la condición «fuerza centrífuga igual a gravedad».

También hay galaxias en las que no se observa ningún movimiento de rotación. Son principalmente las que no presentan espirales. Se observa en ellas una nube difusa de estrellas, y apenas se reconoce ninguna estructura. Pero tampoco estamos perdidos del todo con estos objetos (fig. 9-3). Puesto que estas galaxias no giran, sus estrellas caen continuamente hacia el centro de la galaxia. Pero nada les retiene en el centro, por lo tanto lo atraviesan y pasan al otro lado, hasta que pierden el

impulso e invierten de nuevo el movimiento hacia el centro. Toda la galaxia está formada por un enjambre de estrellas que caen continuamente de las partes exteriores hacia el centro, emergen por el otro lado y acaban regresando obligadas por la fuerza de atracción de la totalidad de las estrellas contenidas en la galaxia. Nosotros vemos la distancia a la que pueden llegar las estrellas individuales antes de que la gravedad de la galaxia fuerce su regreso. No podemos seguir el movimiento de estrellas individuales, pero podemos ver hasta qué distancia del espacio brillan todavía las estrellas. El diámetro de la galaxia nos indica pues aproximadamente dónde deben invertir las estrellas su dirección, obligadas por la gravedad de la galaxia. Si supiéramos ahora con qué velocidad pasan las estrellas por el centro de la galaxia, podríamos determinar la masa de la galaxia, porque entonces sabríamos con qué impulso salen las estrellas de su región central.

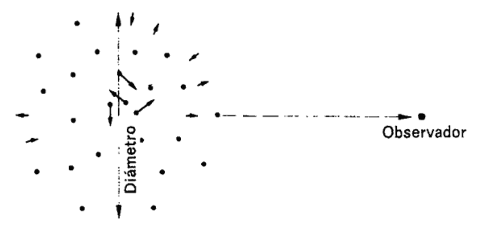


Fig. 9-3. Si un observador mira una galaxia lejana que no gira, puede deducir también su masa. El desplazamiento de las líneas le permite deducir la velocidad de recesión, y la ley de Hubble la distancia. El ángulo con el cual aparece la galaxia en el cielo le proporciona el diámetro. Las estrellas individuales (los puntos negros) se mueven por la galaxia y en cada momento hay estrellas que se dirigen desde el centro de la galaxia hacia él y otras que se alejan de él. Como explicamos en el texto, el efecto Doppler ensancha las líneas de Fraunhofer. El diámetro y el ensanchamiento de las líneas proporcionan una indicación de la masa total de la galaxia.

El efecto Doppler permite de nuevo determinar la velocidad de las estrellas que salen disparadas del centro. Cada estrella del centro contribuye al espectro y a las correspondientes líneas

de Fraunhofer. Hay estrellas que en el momento de la observación salen del centro en dirección hacia nosotros, y otras que apuntando en dirección contraria a nosotros entran en la región central para salir por el lado opuesto. Las estrellas que se acercan a nosotros muestran líneas espectrales desplazadas hacia el azul por el efecto Doppler, las que se alejan están desplazadas hacia el rojo. Al observar la galaxia, que no podemos resolver con el telescopio en estrellas individuales, vemos simultáneamente los dos efectos. Las líneas de Fraunhofer están desplazadas tanto hacia el rojo como hacia el azul, es decir, son *más anchas.* Y a partir de esta dilatación podemos deducir la velocidad con que atraviesan las estrellas la región central. Ésta era la magnitud que faltaba para determinar la masa de la galaxia. Sabemos la distancia a que llegan las estrellas antes de que la fuerza de atracción de la galaxia las obligue a regresar: pero el alcance y la velocidad determinan la masa. Se ha investigado con este método por ejemplo una pequeña galaxia cercana a la nebulosa de Andrómeda (ver la fig. 1-1, donde esta galaxia acompañante aparece como una nebulosidad pequeña y casi redonda al borde de la nebulosa de Andrómeda). El objeto con sus cuatro mil millones de masas solares pertenece a los desheredados galácticos, si se compara con su vecina cien veces más poderosa.

La materia invisible

Hemos visto que las masas de las galaxias pueden determinarse de maneras distintas. El *método de las velocidades internas* estudia los movimientos de una galaxia, por ejemplo su rotación. Si carece de rotación, se obtienen las velocidades medias con que se mueven las estrellas en el campo gravitatorio de la galaxia. El otro método, que llamaremos *método de las velocidades externas,* recurre al movimiento global de la galaxia en otro campo gravitatorio, por ejemplo en el de una galaxia acompañante. Si se dispone de un *grupo* de galaxias (hablaremos después con detenimiento de estos *cúmulos galácticos* que

están ligados mutuamente por su gravedad común), las velocidades con que se mueven unas en relación a otras indican la magnitud de la atracción gravitatoria del grupo. Nos basamos de nuevo en el mismo principio que permite determinar la atracción gravitatoria de una galaxia que no gira: a partir de la velocidad con que se mueven las estrellas en relación unas con otras y a partir del diámetro de la galaxia puede deducirse la masa total que contiene. En un cúmulo galáctico usamos el movimiento relativo de las galaxias y el diámetro de todo el grupo galáctico para conocer la masa total que contiene todo el cúmulo. A partir de este valor también puede determinarse aproximadamente las masas de las galaxias individuales.

Tenemos pues ahora dos métodos para determinar la masa de una galaxia basados en principios diferentes: el método de las velocidades *internas* y el método de las velocidades *externas*.

Si se comparan las masas galácticas determinadas por el método de las velocidades internas, en el que se estudian los movimientos de las estrellas *dentro* de las galaxias, con las masas determinadas por el método de las velocidades externas, en el que se utiliza el movimiento de toda la galaxia en un campo gravitatorio exterior, se llega a una discrepancia que hasta ahora no ha podido esclarecerse: los movimientos interiores permiten deducir masas muy inferiores a los movimientos galácticos en un campo gravitatorio exterior. La masa total de una galaxia determinada a partir de su movimiento en un campo gravitatorio exterior parece ser mucho mayor que la masa que puede esperarse a partir de la materia que brilla en la galaxia.

Recordemos que con el método de las velocidades internas se determina la masa que atrae las estrellas hacia el centro. Con el método de las velocidades externas se obtiene la masa de toda la galaxia. ¿Existe quizá masa adicional en las galaxias que no atrae a las estrellas hacia el centro? Sucedería esto si todas las galaxias tuvieran oculta materia invisible en regiones exteriores, donde no puede verse. ¿Vemos solamente en las galaxias la punta de un iceberg? La materia brillante de una galaxia, es decir, la masa de sus estrellas, parece constituir sólo una décima parte de la masa total. ¿Dónde se oculta el 90 por ciento

restante? La masa oculta no está desde luego en las regiones centrales de las galaxias sino lejos de ellas.

También nuestra Vía Láctea parece estar compuesta de mucha más materia de la que vemos, como se descubre por el movimiento de giro de las estrellas en su borde exterior. Parece como si la materia que falta ocupara un espacio esférico que rodea a todas las galaxias y cuyo diámetro supera en mucho al de la galaxia. ¿Hay también materia en nuestro sistema galáctico, rodeándolo como un halo? ¿Existe un halo adicional en comparación con el cual el que conocemos hasta ahora formado por estrellas y cúmulos globulares es un simple peso mosca? El nuevo e invisible halo debería contener diez veces más materia que toda la Vía Láctea.

El caso de la materia invisible e inencontrable en las galaxias ha provocado continuamente intentos de explicación, como los casos policiacos sin resolver. Se ha hablado de estrellas de poca luz que viven el final de sus vidas como *enanas blancas o estrellas de neutrones*, distribuidas en gran número por el espacio. Se ha recurrido también a legiones de *agujeros negros* (pág. 292). Estos tienen la ventaja de que ejercen una atracción gravitatoria y sin embargo son invisibles, mientras no caiga en ellos casualmente más materia. En los últimos tiempos se ha presentado una solución procedente de un dominio muy distinto (pág. 338).

El zoo de los Universos islas

El mundo de las galaxias es rico en formas. Hay maravillosas espirales, junto a objetos nebulosos y sin estructura. Pero no sólo los brazos espirales brillantes dan su aspecto destacado a determinadas galaxias, también vemos bandas negras que atraviesan galaxias brillantes (fig. 5-1 y 9-1). La banda que divide la Vía Láctea en el cielo en dos bandas parciales se debe a masas de polvo que absorben la luz de las estrellas que hay detrás. Además de las numerosas galaxias relativamente normales, tanto si tienen espirales como si no. hay también objetos

excepcionales, formaciones menos frecuentes, modelos exóticos fuera de serie. Pero intentemos primero orientarnos en el dominio de las galaxias normales.

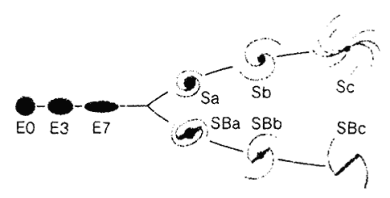


Fig. 9-4. Hubble, para poner orden en la multiplicidad de formas que se observan en las galaxias utilizó el esquema reproducido aquí. Todavía se utiliza actualmente con algunos refinamientos introducidos con posterioridad. Este esquema no se concibió nunca como una secuencia evolutiva, donde por ejemplo una galaxia de un tipo representado a la izquierda al aumentar la edad se transformara en un tipo representado a la derecha.

El mismo Hubble intentó imponer un orden en la multiplicidad de formas. Descubrió un esquema de ordenación que en principio todavía se utiliza actualmente, aunque algo más perfeccionado. Este esquema está representado en la figura 9-4 y no es en absoluto un esquema evolutivo que nos indique de qué forma se desarrolla una galaxia de otra en el transcurso del tiempo. Se basa simplemente en que se conocen en total tres tipos principales de galaxias: galaxias elípticas, espirales y barradas.

El 80 por ciento de todas las galaxias que pueden observarse con grandes telescopios pertenece al tipo elíptico, como las dos galaxias acompañantes de la nebulosa de Andrómeda (fig. 1-1). Sus imágenes no contienen ninguna estructura. Las galaxias elípticas aparecen como manchas difusas, redondas o elípticas, cuya luminosidad decrece desde el centro hacia fuera. Hubble las ha ordenado en subclases de aplanamiento creciente, desde la clase E0 de aspecto circular hasta E7. ¿Son esféricas las de la clase E0? ¿O quizás observamos en cada caso una lente aplanada, que vista de lado parece E7 y contemplada desde arriba proporciona una imagen redonda de tipo E0? Parece ser que entre las galaxias E0 hay en realidad galaxias de

todos los tipos, desde esféricas hasta aplanadas que parecen circulares sólo desde una dirección determinada. Pero tampoco puede excluirse la posibilidad de que además de formas lenticulares haya también formas alargadas, como cigarros gruesos. Si las observamos en una dirección longitudinal, aparecen como E0, vistas de lado aparecen alargadas, como E7.

Las masas de las galaxias elípticas van desde unos cuantos millones de masas solares, es decir, objetos muy pobres, hasta unos cuantos billones de masas solares.

Sorprende que todas brillen con relativa debilidad en comparación con su masa. Puede suponerse que contienen estrellas de la masa del Sol, pero con una centésima parte de su luminosidad. Conocemos estas estrellas en nuestro sistema galáctico. Son enanas blancas que han agotado su reserva de energía nuclear y cuyo brillo disminuye lentamente. Estas estrellas viejas y agotadas tienen escasa luminosidad. Es probable que las galaxias elípticas contengan muchas estrellas viejas, como nuestros cúmulos globulares, aunque las estrellas en estos cúmulos todavía brillan con fuerza. Puede suponerse que las estrellas de la población del halo de la Vía Láctea se parecen de algún modo a las estrellas de las galaxias elípticas, puesto que las estrellas más brillantes de la población del halo son rojizas. También las galaxias elípticas aparecen rojizas como los cúmulos globulares de nuestra galaxia Vía Láctea. ¿Son quizá las galaxias elípticas cúmulos globulares gigantescos?

Vemos en nuestra galaxia que la población del halo está formada principalmente por estrellas bastante aburridas, estrellas que han dejado atrás sus años mejores, y podríamos sospechar que también las galaxias elípticas son objetos muy aburridos. Pero veremos que precisamente en sus regiones centrales tienen lugar fenómenos misteriosos. También pasan cosas a quienes han dejado atrás sus años mejores. En la constelación de Virgo hay la galaxia elíptica gigante M87 (fig. 1-3), de cuyo centro sale disparado a una velocidad de 300 km/s un chorro de gas de brillo más intenso; el señor Meyer lo vio en su primer sueño. ¿Qué pasa en el centro de este gigante?

Al parecer las galaxias elípticas contienen pocas masas de gas y de polvo. Por ello tampoco se forman nuevas estrellas.

No debemos extrañarnos de que las estrellas sean viejas, pues falta descendencia y la población se envejece.

Pasemos ahora a las *galaxias espirales.* Parece que existen dos familias de este tipo. Hay en primer lugar las espirales normales: a partir de una parte central redonda salen de lugares opuestos dos brazos que se enrollan hacia fuera. Hubble ordena esta familia en tres subgrupos Sa, Sb y Se, estando las espirales de Sa enrolladas estrechamente mientras que las de Se aparecen muy abiertas. A medida que se pasa de Sa a Se la parte central se hace cada vez menos brillante. La nebulosa de Andrómeda (fig. 1-1) pertenece al grupo Sb, la galaxia M101 de la figura 1-2 pertenece a Se. Nosotros vivimos dentro de nuestra galaxia y, como los árboles no nos dejan ver el bosque, nos cuesta clasificar nuestro sistema galáctico. Sabemos que posee una estructura espiral, pero sólo podemos hacer suposiciones sobre la abertura de sus brazos espirales. En general se cree que pertenece como la nebulosa de Andrómeda al grupo Sb.

Además de la familia de las espirales normales hay la de las *galaxias barradas.* En ellas los brazos no salen del centro sino de una barra en forma de cigarro (fig. 9-5). Hubble las clasificó según la abertura de sus brazos espirales en tres subgrupos: SBa, SBb, SBc. También aquí la región central de la galaxia va perdiendo importancia a medida que se avanza en el grupo de a a c.

Puede decirse en general que en el esquema de Hubble cuando se pasa de izquierda a derecha aumenta la importancia de las masas de gas y de polvo. En las galaxias del centro y de la derecha pueden formarse todavía hoy estrellas, si la densidad del gas es lo bastante grande. Esto tiene lugar en los brazos espirales. Hasta el momento no se explica del todo por qué nacen las estrellas en las espirales; sin embargo, se dispone de modelos bastante plausibles.

Además de las clases y grupos indicados hay otras galaxias que no encajan en el esquema. No carecen de estructura como las elípticas, pero tampoco tienen espirales. Las dos Nubes de Magallanes que acompañan nuestra Vía Láctea son ejemplos de galaxias irregulares. Carecen de núcleo y de espirales, aun-

que sus estrellas se parecen más a las de las espirales. Al parecer todavía nacen estrellas en ellas, y no es de extrañar, pues contienen mucho polvo y gas. Las galaxias que no entran en ninguna clasificación se incluyen también en las galaxias irregulares.

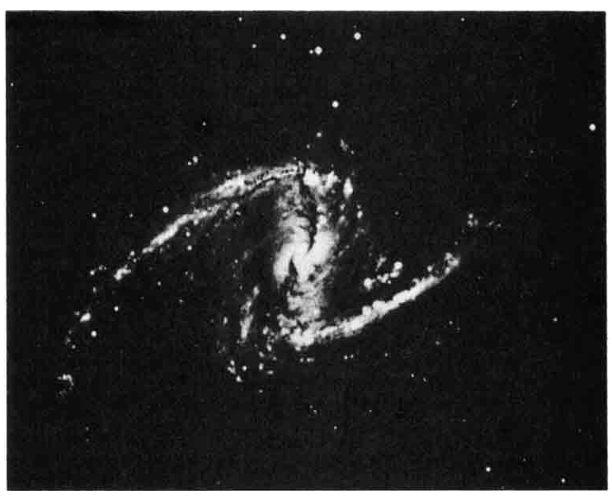


Fig. 9-5. La galaxia barrada NGC 1365. (Fotografía: P. O. Lindblad, Observatorio Europeo Austral.)

Si se determinan las masas de las galaxias espirales e irregulares según los métodos descritos y se comparan con sus luminosidades, parece como si en las galaxias irregulares a una masa solar corresponda sólo una tercera parte de la luminosidad del Sol. Esto es de esperar en estrellas no muy viejas. Por lo tanto, muchas de las estrellas viven todavía de su energía nuclear y alimentan con ella su luminosidad. En promedio emiten menos que el Sol porque en estas galaxias, como en la Vía Láctea, hay muchas más estrellas de masa inferior a la del Sol. Estas estrellas brillan de modo mucho más débil.

Núcleos de galaxias

En los capítulos 1 y 3 entablamos conocimiento con el centro de nuestra galaxia Vía Láctea. Esta galaxia, vista desde nuestro punto de observación en su interior, se oculta detrás de densas nubes de polvo. En cambio podemos ver desde fuera las regiones centrales de otras galaxias, que aparecen abiertas delante de nuestros ojos. Observamos así fenómenos inexplicados en las regiones centrales de las galaxias.

En muchas galaxias espirales se observa en el centro un núcleo casi estelar. Generalmente la región central aparece sobreexpuesta en las fotografías, de modo que el núcleo galáctico no puede reconocerse. En el Observatorio de Tautenburg, en la República Democrática Alemana, se ha desarrollado una técnica especial para hacer visibles estructuras fotográficamente, cuando grandes diferencias de luminosidad impiden la representación simultánea de partes brillantes y partes débiles de una imagen. La figura 9-6 muestra una fotografía de la nebulosa de Andrómeda tomada con esta técnica en la que puede observarse el centro casi puntiforme.

Sin embargo, el objeto en el centro de la nebulosa de Andrómeda no es ninguna estrella. Se observa claramente una extensión espacial, cuyo diámetro puede evaluarse en unos pc. Allí el núcleo expulsa gas caliente, como lo demuestra el espectro: cada año sale masa equivalente a una décima parte de la masa del Sol.

¿Qué hay en aquel lugar de donde salen masas de gas hacia el espacio? Parece un enorme cúmulo estelar, y probablemente haya allí 13 millones de masas solares. Este cúmulo gigante en el corazón de la nebulosa de Andrómeda gira alrededor de su eje en 400.000 años. Esta velocidad es grande. Recordemos que el período de rotación de las estrellas en el disco de una galaxia se mide en centenares de millones de años.

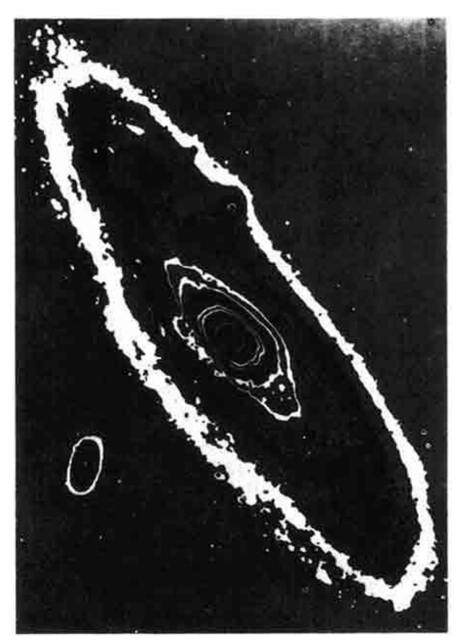


Fig. 9-6. Una carta isofótica de la nebulosa de Andrómeda demuestra que las galaxias contienen en sus regiones centrales concentraciones casi puntuales: son los núcleos galácticos. Las líneas que delimitan regiones de grises distintos de la figura unen puntos de una fotografía de la nebulosa de Andrómeda que tienen idéntico ennegrecimiento, y que por lo tanto son líneas de igual luminosidad. Se observa que en las regiones exteriores son de gran irregularidad pero que hacia dentro se vuelven cada vez más regulares y acaban encerrando una pequeña mancha en el centro. Es el punto más brillante, el núcleo de la galaxia de Andrómeda. Obsérvese que las dos galaxias acompañantes, que hemos señalado ya en la figura 1-1, quedan claramente destacadas gracias a las líneas isofóticas. (Fotografía: Instituto Central de Astrofísica, Potsdam, Observatorio Karl Schwarzschild, Tautenburg, República Democrática Alemana.)

En otras galaxias espirales se observan núcleos más activos todavía, acumulaciones de estrellas calientes que calientan el gas vecino y lo impulsan hacia fuera.

Las galaxias de Seyfert

El astrónomo norteamericano Carl Seyfert investigó en el año 1943 en el Monte Wilson doce galaxias que se distinguían por sus núcleos. Seyfert murió después de la guerra en un accidente de automóvil y no supo nunca la sensación que acabarían creando sus galaxias.

Las galaxias de Seyfert tienen núcleos mucho más brillantes que las nebulosas espirales normales; en el telescopio se ve primero el núcleo brillante como una estrella y luego el disco galáctico que lo rodea. Los diámetros del núcleo parece que oscilan alrededor de unos centenares de pc. Más tarde se descubrió que en estos núcleos hay gas a temperatura extremadamente alta. Allí la radiación caliente ha arrancado los electrones de los átomos del gas. ¡Hay átomos de hierro a los que faltan 13 electrones! Del núcleo de las galaxias de Seyfert sale una intensa radiación térmica: a menudo el núcleo radia en el infrarrojo tanto como todas las estrellas de la Vía Láctea en todos los intervalos espectrales. Parece además que la intensidad de esta radiación varía. A veces aumenta el doble en pocas semanas, para luego descender de nuevo.

Podemos deducir algunos datos sobre estos núcleos de apariencia puntiforme basándonos en la velocidad con que varía su luminosidad. Supongamos que una región extensa puede enviamos radiación desde todos sus puntos (fig. 9-7), pero que de repente la potencia emitida por cada gramo de materia se multiplicara por diez. Supongamos además que observamos el proceso desde gran distancia, desde tan lejos que la fuente extensa de radiación aparece en el telescopio como un punto. La noticia sobre la multiplicación por diez de la potencia nos llega desde puntos distintos de la fuente en tiempos algo distintos. Primero recibimos la radiación reforzada del punto más próximo, luego la de regiones de la fuente más alejadas. La potencia de la fuente se eleva de golpe, pero nosotros sólo captamos un aumento lento. El intervalo de tiempo que tarda la fuente en brillar diez veces más, corresponde aproximadamente al tiempo que necesita la luz para recorrer el diámetro de la fuente.

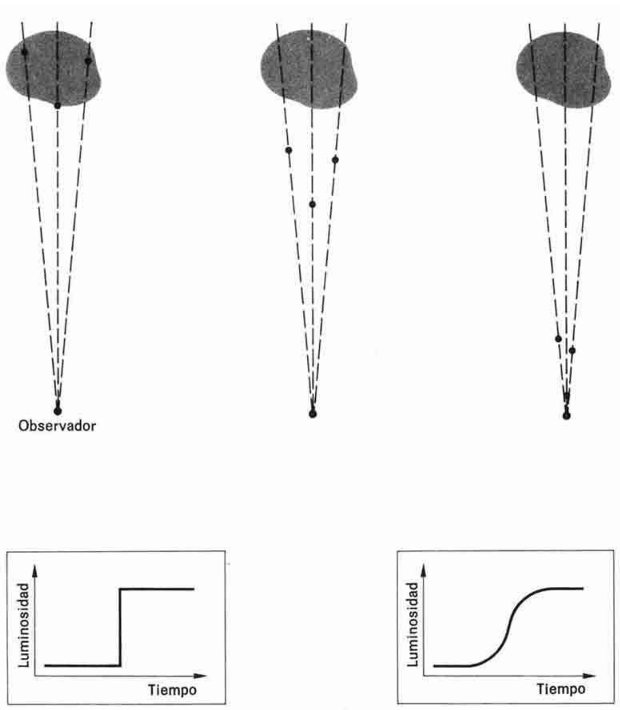


Fig. 9-7. Cuando aumenta repentinamente la luminosidad de un cuerpo tan alejado de un observador que aparece como un punto (gráfica inferior izquierda), el observador percibe un aumento paulatino de la luminosidad (gráfica inferior derecha). Esto se debe a que la luz procedente de puntos diferentes del cuerpo ha de cubrir trayectos de diferente longitud para llegar al observador y por lo tanto las señales sobre el aumento de luminosidad llegan también por partes, como se ve en los dibujos parciales superiores que muestran señales luminosas procedentes de tres puntos de la nube. A la izquierda la nube emite tres señales. A la derecha la primera señal ha llegado casi al observador, pero las otras dos llegarán más tarde.

Si el núcleo de una galaxia de Seyfert duplica para nosotros su luminosidad en dos semanas, la radiación debe llegar de una región cuyo diámetro no será muy superior a la distancia que

recorre la luz en dos semanas: once milésimas de pc, o sea menos de una centésima parte de la distancia desde el Sol a la estrella más próxima, es decir, una distancia pequeña dentro de una galaxia. De este pequeño espacio llega una potencia comparable a la de toda nuestra galaxia con sus 100.000 millones de estrellas. En una galaxia de Seyfert se han observado oscilaciones de su luminosidad en rayos X a intervalos de 100 segundos (ver la pág. 297).

¡Qué enormes fuentes de energía se ocultan en los núcleos de las galaxias de Seyfert! Veremos luego que estos objetos presentan muchas semejanzas con otro tipo de objetos aparentemente muy distintos, los llamados *quasares*, que trataremos en el capítulo 11.



Fig. 9-8. Parte interior del cúmulo de Virgo. Todos los miembros del cúmulo distan aproximadamente igual de nosotros, por lo tanto los tamaños distintos de las galaxias en la fotografía corresponden a diferencias reales de tamaño. Los puntos definidos son estrellas de nuestra galaxia, que por lo tanto están en primer plano. (Fotografía: Centro Astronómico Hispano-Alemán.).

Cúmulos de nebulosas espirales

No sólo las galaxias individualmente ocultan misterios en su interior, también las galaxias en su totalidad presentan propiedades inexplicables.

Ya Alexander von Humboldt se extrañó de que las nebulosidades observadas por Herschel en el cielo no estuvieran distribuidas uniformemente. En su obra *Kosmos* aparecida en 1850, cita el cúmulo de Virgo que nosotros hicimos ver al señor Meyer en su primer sueño.

El hecho de que las galaxias no llenen el cielo de modo uniforme se debe a su atracción mutua. Hemos visto ya que hay galaxias que giran una alrededor de la otra, ligadas por su atracción mutua. A veces algunas galaxias se acercan tanto que intentan robarse mutuamente estrellas. Una galaxia extrae de la otra toda una cadena de estrellas, y parece que las galaxias tengan cola. Pero éstos son casos aislados, que no tienen tanta importancia como la preferencia de las galaxias por aparecer en grupos.

Nuestra propia galaxia Vía Láctea no está aislada en el espacio. Pertenece a una familia que consta a su vez de tres subgrupos. El primero lo formamos nosotros con las dos Nubes de Magallanes y algunos sistemas más pequeños. A 670 kpc está la nebulosa de Andrómeda con sus galaxias acompañantes. Pertenece también a este grupo la galaxia M33 de tipo Se, con varias galaxias más pequeñas. Existe finalmente un subgrupo de sistemas estelares menos prominentes. En total la familia consta de unos 30 miembros. La mitad de los objetos más débiles son *galaxias enanas,* pequeños conjuntos de estrellas relativamente poco numerosas. Parecen casi cúmulos estelares globulares de tamaño algo exagerado. Pero esto no es cierto, porque el sistema del Horno, una de estas galaxias enanas, contiene por lo menos cinco cúmulos globulares propios. Pero la familia de todos estos objetos, el *grupo local,* que se extiende a lo largo de 2 Mpc, es un objeto realmente pobre.

A 24 Mpc de distancia en la dirección de la constelación de Virgo hay una reunión de galaxias mucho más espectacular, el *cúmulo de Virgo* (fig. 9-8; el señor Meyer lo contempló en el

capítulo 1). Hay 2.500 galaxias en una región de unos 5 Mpc de diámetro, retenidas por su gravedad mutua. Este cúmulo galáctico se mueve como un todo con la velocidad de recesión que le corresponde según la ley de Hubble, unos 1.000 km/s. Sin embargo, cada galaxia se mueve en complicadas trayectorias, como si fuera un enjambre gigante de abejas, que a pesar de su movimiento mutuo se mantiene unido. Este cúmulo es tan grande, que la superficie que ocupa en el cielo nocturno apenas puede cubrirse con la mano extendida, a pesar de su enorme distancia. Las galaxias de este cúmulo son tan débiles, que las más brillantes no llegan a captarse con los prismáticos. Se necesita por lo menos un telescopio de aficionado grande.

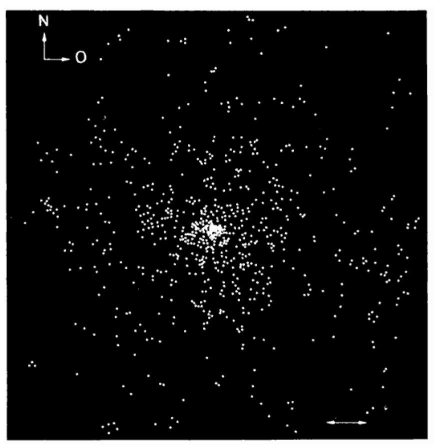


Fig. 9-9. Distribución en el cielo de los miembros más brillantes del cúmulo de la Cabellera. Cada punto representa una galaxia. La distancia indicada debajo a la derecha equivale al diámetro de la Luna llena (según F. Zwicky).

A una distancia siete veces superior a la del cúmulo de Virgo hay otro cúmulo galáctico todavía más rico, en la constelación de la Cabellera de Berenice (fig. 9-9), que se aleja de nosotros con una velocidad de casi 7.000 km/s.

Se ha explorado sistemáticamente el cielo en busca de galaxias y se ha descubierto que la existencia de cúmulos galácticos es muy normal. Probablemente el 70 por ciento de todas

las galaxias forman parte de cúmulos. El astrónomo californiano George Abell (1927-1983) publicó en 1958 una lista de 2.712 cúmulos galácticos, la mayoría de los cuales contienen más de 50 galaxias. Los cúmulos galácticos más lejanos del catálogo de Abell están a 300 Mpc de distancia en el espacio.

En muchos cúmulos parece existir una especie de supergalaxia que supera a todas las demás en masa y luminosidad, y de la que puede por lo tanto sospecharse que se ha enriquecido a costa de las demás.

El canibalismo de las galaxias

A menudo en las regiones centrales de los grandes cúmulos galácticos los sistemas estelares individuales están tan próximos, que su distancia mutua es comparable con su diámetro. Los choques son inevitables. ¡Galaxias que entran en colisión! ¿Qué sucede en tales casos?

A primera vista nada, porque las galaxias están formadas principalmente por estrellas separadas por espacios casi vados. Cuando dos galaxias chocan, penetran una dentro de la otra sin que choquen sus estrellas componentes. Las estrellas son puntos tan diminutos en el espacio vacío que si exceptuamos algunos casos raros y sin importancia, cada estrella de una galaxia pasa de largo de las estrellas de la otra. En cambio las masas de gas y de polvo chocan entre sí con grandes velocidades, aunque esto no debería afectar mucho a las galaxias. En los últimos tiempos se ha comenzado a reproducir en computador la penetración mutua de dos galaxias.

El choque de las estrellas individuales no desempeña ningún papel. Esto ya se sabía antes de introducir el problema en el computador. Lo que influye en las estrellas de ambas galaxias es la gravedad. Puede ser muy bien que la galaxia más pequeña quede integrada en la grande sin ni un solo choque. Es decir, que en los cúmulos galácticos una galaxia puede devorar a otra. Es posible incluso que vaya devorando a una galaxia tras otra y que se convierta al final en la galaxia más gruesa y gorda del cúmulo, a la que llamaremos supergalaxia. Esta galaxia está

sentada en su nido como un cuclillo joven y domina el cúmulo galáctico.

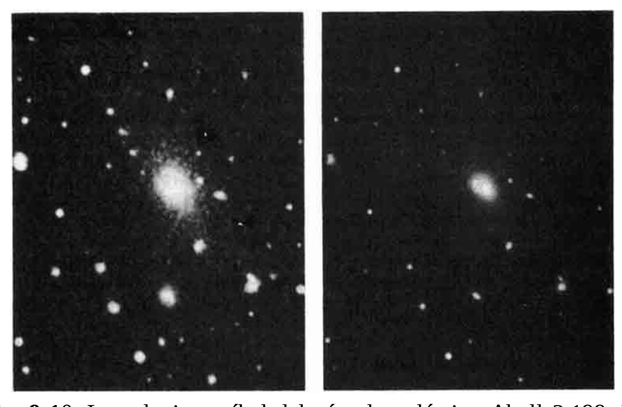


Fig. 9-10. La galaxia caníbal del cúmulo galáctico Abell 2.199. La estructura granular de la fotografía de la izquierda se debe a la placa fotográfica utilizada para la ampliación. La galaxia NGC 6166 está en el centro de la fotografía de la izquierda, como una mancha clara poco definida. A la derecha se ve que la galaxia está formada por tres condensaciones. ¿Se ha «tragado» la galaxia, dos galaxias más pequeñas, cuyas regiones centrales densas todavía no se han disuelto y por lo tanto aparecen como «nudos brillantes» en la galaxia? Obsérvense en la fotografía de la derecha las numerosas galaxias, como manchas difusas a menudo de forma alargada, que se distinguen de las imágenes claras bien definidas y redondeadas de las estrellas que se encuentran delante. (Fotografía de la izquierda: © 1960, National Geographic Society - Palomar Sky Survey. Reproduced by permission of the California Institute of Technology; fotografía de la derecha: B. Loibl, Centro Astronómico Hispano-Alemán.)

En el cúmulo número 2.199 del catálogo de Abell hay una galaxia de este tipo, tan grande y dominadora que puede sospecharse con razón que en el pasado se alimentó a menudo de sus galaxias hermanas. Pero esta sospecha ha resultado ser una certeza. Se ha fotografiado la galaxia gigante con un tiempo de exposición corto, para hacer transparente la región central que normalmente queda sobreexpuesta y aparece como una simple mancha. Se ha visto entonces que la galaxia tiene en su buche dos galaxias pequeñas todavía sin digerir (fig. 9-10).

Parece ser que en los cúmulos galácticos pasan cosas más interesantes de lo que puede sospecharse a simple vista. Esto se comprobó cuando se elevaron con cohetes por encima de la atmósfera terrestre, opaca a los rayos X, receptores de esta radiación y se buscaron fuentes de rayos X. Muchos cúmulos galácticos «brillan» con luz de rayos X. Y no sólo captamos radiación de las galaxias del núcleo, sino también del espacio vacío que las separa. Parece ser que en las regiones interiores de los cúmulos galácticos hay gas con una temperatura de *millones de grados* que emite radiación térmica (ver la pág. 40). Este calor genera rayos X. ¿De dónde procede el gas que hay entre las galaxias? Se trata probablemente de masas gaseosas que las galaxias del cúmulo han perdido. Parece que ninguna galaxia ha conservado la totalidad de sus masas gaseosas. Las galaxias expulsan nubes de gas al espacio, especialmente si poseen núcleos activos. Estas masas gaseosas se pierden normalmente en el espacio intergaláctico y se rarifican hasta acabar siendo imperceptibles. Pero en los cúmulos galácticos se acumulan seguramente en los lugares a donde les lleva la gravedad, es decir, en el centro del cúmulo. Es probable que los sistemas estelares que pasan por esta región a gran velocidad calienten este gas haciéndolo brillar en el dominio de los rayos X.

Los cúmulos galácticos forman supercúmulos

Los cúmulos galácticos no son los mayores conjuntos en los que se reúne la materia del Universo. En la dirección de la constelación de Hércules, a una distancia de unos 200 Mpc hay varios cúmulos estelares en una región del espacio que tiene un diámetro de unos 100 Mpc. La gravedad de estos *supercúmulos* no es suficiente para retenerlos unidos contrarrestando la expansión de Hubble, como sucede con los cúmulos galácticos. El supercúmulo de Hércules aumenta de tamaño a medida que pasa el tiempo.

Nuestro sistema local de galaxias pertenece a un conjunto de cúmulos galácticos en cuyo centro está el cúmulo de Virgo. También esta reunión de grupos galácticos aumenta de tamaño

siguiendo la expansión del Universo. Hemos visto ya que el cúmulo de Virgo se aleja de nosotros. De todos modos, parece como si el conjunto de Virgo con su gran poder de atracción perturbara notablemente el movimiento de Hubble de sus componentes. Esta circunstancia plantea problemas en la determinación de la constante de Hubble. Sin embargo, el cúmulo de Virgo no se expande con el movimiento de Hubble. Sus miembros están tan juntos que la gravedad mutua los mantiene unidos.

Los supercúmulos están menos apretados que los cúmulos galácticos. Es probable que todos los cúmulos galácticos formen supercúmulos. Se cree que no hay ninguna galaxia fuera de los supercúmulos. Si una galaxia está aislada y no forma parte de ningún cúmulo galáctico, ha de pertenecer por lo menos a un supercúmulo, según lo que hoy sabemos. Fuera de los diversos supercúmulos no hay nada, y entre ellos hay grandes espacios vacíos. No parece sin embargo que exista ninguna supersuperestructura. Las mayores estructuras en la distribución de la materia del Universo presentan diámetros de 50 hasta 100 Mpc. El supercúmulo de Hércules es el mayor conocido ahora. Si la materia cósmica está concentrada en estrellas, galaxias, cúmulos galácticos y en supercúmulos, al parecer los supercúmulos llenan el Universo de modo uniforme. Podemos decir pues que el Universo a grandes rasgos es igual en todas partes y no contradice el principio cosmológico.

La palabra supercúmulo es equívoca porque sugiere un cuerpo más o menos esférico. No es así. Parece ser más bien que los cúmulos galácticos están conectados entre sí a través del espacio mediante «pasarelas» y «paredes». En ellas hay galaxias, mientras que el espacio intermedio está vacío. Tenemos una especie de estructura alveolar o celular. El holandés Jan Oort escribió en 1982: «El Universo está formado por muchas células que se entrechocan. El interior de estas células está vacío (es decir, no contiene materia brillante), las paredes de las células están formadas por una capa delgada de galaxias. En algunos lugares las paredes están reforzadas formando cadenas de cúmulos. Estas cadenas se unen en nudos muy ricos en ga-

laxias en cuyo centro suele haber un cúmulo estelar muy destacado (cúmulo de Perseo, cúmulo de Virgo...)». Esto dice uno de los astrónomos más importantes de nuestro siglo. El diámetro de las células de que habla es de 50 a 100 Mpc: éstas son las mayores estructuras que vemos en nuestro Universo.

Las galaxias individuales presentan pequeños movimientos de perturbación, que se sobreponen a la expansión uniforme de Hubble, pero estos movimientos son reducidos. Las superestructuras no se «corren» a lo largo del tiempo por culpa de estos movimientos. Sus miembros, las galaxias y los cúmulos galácticos, no llenan a medida que pasa el tiempo los espacios vacíos entre las «paredes celulares». La edad del Universo es demasiado corta y el movimiento de perturbación demasiado reducido. Debemos pues suponer que las acumulaciones de materia que observamos en las superestructuras están allí desde los inicios del Universo y que la expansión del Universo no ha hecho más que aumentar su diámetro.

Por lejos que miremos en el espacio siempre vemos galaxias, reunidas en cúmulos y en supercúmulos. ¿Dónde está el final? Nuestros telescopios nos fijan la frontera provisional. Cuanto más lejos está una galaxia, más se enrojece la radiación que nos envía y más se debilita por el efecto de enrarecimiento. Más difícil es entonces separarla en una fotografía astronómica del fondo del cielo, sobre el cual apenas se destaca. Únicamente gracias a las ondas de radio hemos podido descubrir la existencia a más distancia todavía de otros cuerpos celestes.

X. EL CIELO DE RADIO

> Escuchar a Cristóbal Colón en una taberna mal iluminada y ante un vaso de Oporto relatando sus aventuras y hablando de los paisajes lejanos que nadie había visto antes que él fue sin duda una experiencia excitante, que nadie olvidaría... ¿Pero llegó alguna vez a la especial fascinación de una velada con Walter Baade, de los Observatorios de Monte Wilson y Monte Palomar, fallecido hace poco?... Una tarde Baade nos contó la historia de Cygnus A, y lo hizo lleno de ideas chispeantes, confiando en sus últimas cifras y resultados, modesto, capaz sin embargo de críticas duras, libre y amable.
>
> I. ROBBINSON, A. SCHILD Y E. L. SCHÜCKING, 1964

Todo lo que se sabía en los dorados años veinte de la investigación galáctica procedía de las observaciones ópticas, que utilizan únicamente la luz visible. La atmósfera terrestre es transparente a esta luz. Podemos estar contentos, de lo contrario la luz del Sol no podría penetrar hasta nosotros, en el fondo de la atmósfera. Como vimos en el capítulo 2, la luz es únicamente radiación electromagnética de un intervalo determinado de longitudes de onda. Nadie hubiera sospechado antes que la atmósfera terrestre fuera transparente también para otras longitudes de onda muy distintas y que por lo tanto llega a la superficie terrestre más información procedente del Universo. Cuando se generó en la Tierra radiación electromagnética de gran longitud de onda, para utilizarla en la transmisión de noticias, se descubrió casualmente que el Universo nos envía una lluvia continua, día tras día, de estas radiaciones. Cuando empezamos a emitir y a recibir ondas de radio en la superficie terrestre descubrimos que el cielo está lleno de emisoras de radio.

El nacimiento de la radioastronomía

A mediados de mayo de 1933 la emisora de Nueva York WJZ deparó una sorpresa a sus oyentes del programa de noche. El locutor dijo a su público: «Ustedes han oído a menudo transmisiones a gran distancia, a través de todo el continente americano, de Europa y de Australia. Esta noche queremos ofrecerles una transmisión mucho más lejana, una transmisión que superará todos los récords de distancia. Vamos a ofrecerles impulsos de radio procedentes de algún lugar exterior al Sistema Solar, de alguna región de las estrellas... Escuchen ustedes mismos el ruido radiofónico procedente de las profundidades del espacio... Gracias a la colaboración de la American Telephone and Telegraph Company vamos a conectar con el sensible receptor de Holmdel, situado a 50 millas al suroeste de Nueva York.»

La conexión se hizo, y se oyó un ruido como el de vapor en un escape de la calefacción. Siguió un breve comentario, diez segundos más de silbidos de vapor y luego la voz del ingeniero de radio Karl Jansky, que había construido la instalación receptora. El programa finalizó con una recomendación a los oyentes para que mantuvieran sus antenas en perfecto estado a fin de poder disfrutar en adelante de los maravillosos programas de radio de la emisora.

La emisión no constituyó ninguna sorpresa para muchos lectores de periódicos. Ya el día 5 de mayo el *New York Times* había dedicado toda una columna de primera plana al tema. En esta página podía leerse que Roosevelt exigía un aumento salarial para los obreros, que los japoneses preparaban una nueva y gran ofensiva en el norte de China, que se esperaban 250.000 partidarios de Hitler en Düsseldorf, que un amigo de la familia se ofrecía como rehén a los secuestradores del niño McMath. En la columna de la izquierda se leía que Karl Jansky había captado ondas de radio procedentes del centro de la Vía Láctea. Al final del artículo, el descubridor, sin duda respondiendo a preguntas del periodista, declaraba que no había ningún indicio de que la radiación que acababa de descubrir procediera de seres inteligentes en el espacio.

¿Qué estaba pasando en Holmdel, Nueva Jersey, donde la Bell Telephone Company mantenía un gran centro de investigaciones, y quién era aquel ingeniero de radio Karl Jansky?

Los Jansky eran inmigrantes checos, y el abuelo de Karl Jansky había llegado al Nuevo Mundo con un barco todavía de vela. La Bell había contratado al joven Karl, de veintitrés años, no para la investigación pura, sino para una tarea muy práctica. La radiotecnia calzaba todavía zapatos de niño, y el número creciente de oyentes creó una nueva industria. Escuchar la radio se había hecho popular, pero la recepción de las ondas de radio, 20 años antes de que se abriera la frecuencia modulada, no era siempre un placer. En los auriculares y altavoces se oían crujidos y ruidos, y a veces el ruido echaba a perder toda la emisión. Sólo ocasionalmente podían oírse emisoras lejanas. Pronto se descubrió que las tormentas eran a menudo las causantes de las interferencias, aunque tuvieran lugar a grandes distancias. Pero a veces se oían ruidos sin que pudiera culparse a ninguna tormenta. ¿Se debían a descargas eléctricas entre nubes sin que hubiera una tormenta de por medio? Se sabía también que la ignición de un motor de gasolina podía provocar interferencias. Todavía no se había explorado el dominio de las interferencias de radio, y los laboratorios Bell emprendieron mediciones sistemáticas en todas las longitudes de onda. Karl Jansky fue uno de los ingenieros que debía encargarse de la tarea. Su cometido principal era investigar el dominio de las ondas cortas. Cuando tuvo sus aparatos preparados en Cliffwood, Nueva Jersey, y quería empezar las mediciones en diciembre de 1929, el laboratorio de Cliffwood se trasladó a Holmdel. Jansky erigió pues sus aparatos de medición otra vez en un terreno que había sido antes un campo de patatas. El retraso debido al traslado fue de un año.

La estación receptora de Jansky era una construcción muy aventurera. Construyó con tubos de cobre y maderas un varillaje de 30 metros de largo y varios metros de alto, sostenido por un gran marco. Este marco se movía sobre las cuatro ruedas de un Ford modelo T desmontado que rodaban sobre un anillo

empotrado con cemento en el suelo. Esto permitía mover la antena. El aparato cuando estaba en marcha daba una vuelta en 20 minutos y así exploraba el cielo en todas direcciones.

Las ondas captadas por la antena (la longitud de onda de recepción era de 14,6 metros) se ampliaban en un receptor y además de hacerse audibles se registraban en una cinta de papel. De este modo se podía determinar no sólo la intensidad de la señal captada, sino que la situación de la antena daba también la dirección celeste de la cual llegaba la señal. Jansky podía registrar las señales de los relámpagos y comprobar que había realmente una tormenta en la dirección correspondiente. Pero había también señales que no pudo atribuir a ningún fenómeno conocido.

Es difícil deducir de su cuaderno de observaciones en qué momento registró una señal de procedencia cósmica. Según contaron sus amigos y colegas, sus pensamientos en los meses de julio y de agosto de 1932 estaban centrados continuamente en el esclarecimiento de señales que sin duda no tenían nada que ver con fuentes conocidas.

Jansky podía oír con los auriculares un susurro débil, apenas perceptible, pero más intenso que el inevitable ruido de fondo de su receptor. ¿Eran interferencias de líneas vecinas de alta tensión? El susurro no venía siempre de la misma dirección. Durante algún tiempo le pareció que la fuente salía y se ponía con el Sol, pues el ruido empezaba por la mañana en oriente y finalizaba por la tarde en occidente. ¿Era responsable el Sol? Pero cuanto más tiempo estuvo observando más clara era la diferencia entre la aparición y la desaparición de la fuente y las horas de salida y puesta del Sol. Cada día la fuente salía con alguna antelación, y al cabo de un mes salía adelantada dos horas y desaparecía dos horas antes de la puesta del Sol. Por lo tanto, la fuente adelantaba cada día cuatro minutos respecto del Sol. Pero éste es un fenómeno que conoce cualquier astrónomo aficionado. El Sol y las estrellas salen y se ponen con ritmos distintos, debidos al movimiento de la Tierra alrededor del Sol. El día estelar es cuatro minutos más corto que el día solar. La fuente de Jansky no se movía en el cielo como el Sol, sino que pertenecía evidentemente al mundo de las estrellas. Pronto

comprobó que su fuente estaba en la constelación de Sagitario; ¡Jansky había descubierto con su antena de radio el centro de la Vía Láctea! Acababa de nacer así la radioastronomía.

En realidad el mundo astronómico debería haber acogido la noticia como algo sensacional, pero no fue así. Los trabajos de Jansky publicados parcialmente en revistas de radiotecnia no despertaron ningún interés entre los astrónomos. Sus planes para construir una antena mejor no encontraron ningún apoyo, ni en su empresa ni entre los astrónomos. La época no estaba madura.

Jansky, siempre algo enfermizo y torturado toda su vida por una dolencia renal, se convirtió en el especialista de Bell en interferencias de la recepción radiofónica. Durante los años treinta resumió varias veces sus resultados en publicaciones y conferencias. Durante la guerra trabajó en problemas de radiogoniometría. Nunca fue una persona ambiciosa. Cuando murió a los cuarenta y cuatro años, en 1949, de un ataque de apoplejía, sus amigos dijeron que siempre había sido consciente de que no llegaría a viejo.

El nacimiento de la radioastronomía tiene todavía otro elemento trágico. Dos años antes de que Jansky empezara sus mediciones en Holmdel, Gordon Stagner, un joven ingeniero de radio, trabajaba en una emisora de Manila perteneciente a Radio Corporation of America (RCA). Oía en su receptor silbidos que en determinadas horas del día eran más intensos que nunca. Antes de que pudiera estudiar detenidamente el fenómeno, le dijeron que se ocupara de su trabajo y no perdiera el tiempo con otras cosas. Stagner no pudo pues analizar con mayor detenimiento el fenómeno. Hoy se cree con bastante seguridad que Stagner había descubierto antes que Jansky la radiación de radio de la Vía Láctea. La estrechez de miras de sus superiores le impidió esclarecer el fenómeno.

Dos millas al norte del campo de patatas de Holmdel tendría lugar 32 años después de Jansky otro magnífico descubrimiento astronómico que tiene gran importancia para el tema que nos ocupa. Hablaremos de él en el capítulo 12.

Las ondas de radio de la Vía Láctea

Si se dirige hoy en día un moderno radiotelescopio hacia el cielo, salta inmediatamente a la vista en las cintas registradoras la emisión de radio de la Vía Láctea. Una ancha banda recorre la esfera celeste y su luminosidad de radio disminuye a ambos lados, siendo especialmente brillante en el centro de la Vía Láctea (fig. 10-1 y fig. 1-5). Esta radiación no procede de estrellas individuales, sino del espacio interestelar lleno de masas gaseosas. Vamos a estudiar un poco más el mecanismo que al parecer crea en una materia extraordinariamente enrarecida una especie de radiación, que en la Tierra sólo puede generarse con complicados aparatos electrónicos, esto es, precisamente con las emisoras de radio. ¿Cómo consigue la naturaleza hacer en cierto modo de la nada algo parecido? Es notable que la primera idea sobre el tema la tuviera no un astrónomo ocupado en la Vía Láctea, sino un hombre procedente de otro campo muy distinto. El físico solar Karl Otto Kiepenheuer (1910-1975), nacido en Friburgo, y que trabajaba entonces invitado en la Universidad de Chicago, resolvió el enigma en 1950.

Estudiemos con mayor detenimiento el espacio interestelar. Hemos dicho ya que en promedio un centímetro cúbico contiene sólo un átomo. La materia está tan extraordinariamente enrarecida, que el mejor vacío que podemos crear en los laboratorios terrestres es en comparación suya un caldo espeso. Pero en el espacio entre las estrellas hay también campos magnéticos débiles. Su intensidad es ciertamente una cienmilésima del campo terrestre que orienta nuestras brújulas, pero su acción es perceptible. Al parecer, las líneas del campo magnético se ajustan estrechamente a los brazos espirales. No sabemos exactamente de dónde proceden, pero sabemos que están allí. Las partículas de polvo, que no son en absoluto esféricas, sino alargadas, se sitúan transversales a estas líneas de campo obedeciendo complicados efectos dinámicos, y esto puede deducirse de la luz que atraviesa estas nubes de polvo. Sabemos pues que en la Vía Láctea hay campos magnéticos que ocupan grandes espacios.

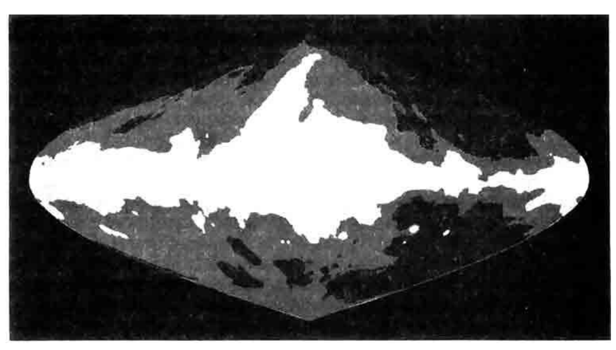


Fig. 10-1. Emisión de radio de la Vía Láctea en una frecuencia de 408 MHz, es decir, en una longitud de onda de 73 cm. El cielo entero es la superficie casi ovalada, proyectada de modo que la línea central de la Vía Láctea caiga sobre la línea media horizontal de la figura. El dibujo se basa en mediciones de 13 radioastrónomos conducidos por Glyn Haslam, que trabajaron durante quince años en Jodrell Bank (Inglaterra), Parkes (Australia) y Effelsberg (República Federal Alemana). Si se trasladara aquí la figura 1 -5 del radiocentro de la Vía Láctea, serla un rectángulo con lados de 1,2 mm y 0,6 mm. Quedarla totalmente dentro de la región que aquí aparece en blanco. Para mostrar la intensa radiación del centro la escala de grises de la figura 1-5 se escogió de modo que sólo destacara en blanco la región central.

En el medio interestelar, además de gas, polvo y campos magnéticos hay también *radiación cósmica.* Esta radiación, a diferencia de la electromagnética, está formada por partículas en rápido movimiento. En la superficie terrestre medimos también esta radiación, y nuestro cuerpo está continuamente atravesado por las partículas rápidas que la constituyen. Gracias a Dios, su intensidad es inofensiva cuando llega aquí. Probablemente recibieron toda su energía en las explosiones de supernovas. Cuando estalla una supernova en nuestra galaxia, proyecta partículas a gran velocidad al espacio. Las partículas se emiten como núcleos atómicos, despojados de todos sus electrones, y los electrones escapan también separados de los núcleos. Las velocidades son muy grandes y muchos electrones se desplazan a velocidades próximas a la de la luz. Puesto que

son partículas cargadas, captan las fuerzas del campo magnético. Las partículas electrónicas no se mueven libremente en las direcciones en que fueron proyectadas, pues sus trayectorias se curvan por la acción de las fuerzas magnéticas. Lo más fácil para ellas es moverse a lo largo de las líneas del campo magnético. También pueden desplazarse transversalmente a estas líneas, pero los campos magnéticos les obligaron continuamente a dar la vuelta de modo que en total sólo pueden moverse trazando trayectorias parecidas a espirales alrededor de las líneas de campo. Esto dificulta a las partículas el abandono de la Vía Láctea, puesto que, al estar las líneas de campo en el disco de la Vía Láctea, las partículas de la radiación cósmica permanecen en su proximidad. Pero ¿qué tiene esto que ver con la emisión de radio?

Cuando los electrones se mueven con mucha mayor velocidad en la trayectoria curva, emiten radiación. La radiación tiene un espectro continuo que puede extenderse desde las frecuencias de radio hasta las de la luz visible. Las ondas de radio de la galaxia provienen de hecho de los electrones de la radiación cósmica.

Esto no sólo puede observarse en nuestra galaxia, sino que la nebulosa de Andrómeda también brilla en el dominio de radio, y de hecho todas las galaxias que están lo bastante cerca de nosotros revelan los electrones rápidos de su radiación cósmica con el brillo difuso que emiten en el dominio de radio.

Nuestra galaxia alberga también otras radiofuentes. Sin embargo, vamos a limitamos primero a la radiación generada por los electrones de movimiento rápido, la llamada *radiación sincrotrónica.* Esta radiación nos llega en forma relativamente inofensiva procedente de los electrones retenidos por campos magnéticos débiles. En el Universo hay también emisores sincrotrónicos de intensidad enorme, pero en su caso ignoramos por qué sus electrones tienen tanta energía y sus campos magnéticos tanta intensidad. Sólo sabemos que la radiación que llega a nuestro radiotelescopio es sincrotrónica.

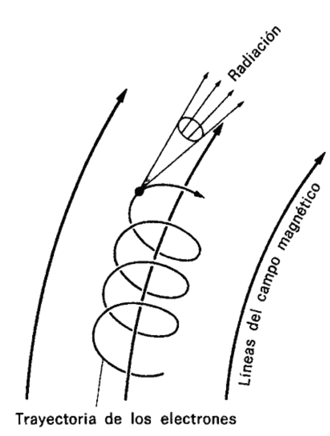


Fig. 10-2. Así se genera la radiación sincrotrón. Cuando un electrón se desplaza en un campo magnético gira siguiendo una órbita espiral alrededor de una línea del campo magnético. SI su velocidad es próxima a la de la luz, emite, al girar, radiación electromagnética en la correspondiente dirección de movimiento. Un cono de radiación que sigue el movimiento de giro del electrón barre el espacio. En la Vía Láctea hay muchos electrones que giran a gran velocidad alrededor de las líneas del campo magnético galáctico, y en cada instante pasan sobre nosotros muchos conos de radiación. Ésta es la radiación que emite la Vía Láctea en el dominio de radio. La radiación sincrotrón también puede ocupar el dominio visible o de rayos X.

¿Cómo lo sabemos? También las nubes de gas interestelar de la Vía Láctea, calentadas por estrellas próximas y calientes, radian una parte considerable de su energía en forma de ondas de radio. Esta radiación se genera del siguiente modo: los átomos han perdido hace tiempo su envoltura electrónica debido a las altas temperaturas de estas nubes, unas decenas de miles de grados. Los electrones que han quedado libres se mueven con grandes velocidades a través del espacio. Pero sus 700 km/s están todavía muy por debajo de la velocidad de la luz, que es cuatrocientas veces superior. Mientras vuelan por el espacio chocan continuamente con núcleos atómicos y se desvían en cada choque de la línea recta emitiendo un cuanto de radiación. La radiación de un gas, emitida por los innumerables

electrones que chocan y son rechazados, es su radiación térmica, la radiación descrita en el capítulo 2. El radiotelescopio permite «ver» las masas de gas caliente de la Vía Láctea, como la nebulosa de Orión, porque sus electrones radian al chocar, y lo hacen continuamente. Tenemos pues dos tipos de radiación de radio emitidas por los electrones en movimiento: la radiación sincrotrón debida a los electrones que se desplazan con velocidad próxima a la de la luz, y la radiación térmica debida a electrones relativamente lentos que chocan con los núcleos atómicos del gas.

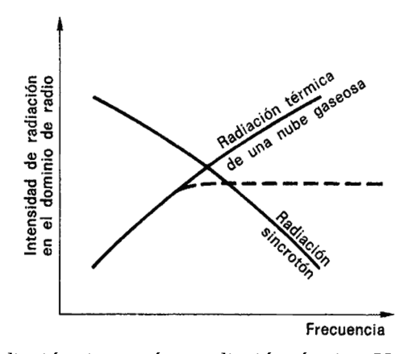


Fig. 10-3. Radiación sincrotrón y radiación térmica. Una nebulosa gaseosa emite radiación térmica en el dominio de radio. Las nebulosas gaseosas tienen temperaturas de varias decenas de miles de grados, por lo tanto en el dominio de radio se mide la parte del espectro térmico que en la figura 2-9 está muy a la derecha (en las longitudes de onda grandes). Allí la intensidad de la radiación disminuye al aumentar la longitud de onda (es decir, al disminuir la frecuencia). Por esto la intensidad de radio de una fuente de radiación térmica cuya temperatura es la de una nebulosa gaseosa aumenta con la frecuencia. Las nebulosas gaseosas se hacen transparentes para frecuencias superiores, por ello la curva de la radiación térmica se aplana hacia la derecha (curva de trazos). En cambio la intensidad de la radiación sincrotrón disminuye al aumentar la frecuencia.

¿Cómo podemos saber al captar una radiación que se trata de una u otra posibilidad? Hay varios caracteres que las diferencian. La característica más sencilla es que la radiación térmica de las nubes de gas caliente aumenta de intensidad hacia

las frecuencias elevadas, en cambio la radiación sincrotrónica se hace más débil (fig. 10-3). En realidad la radiación de la Vía Láctea es más débil en las altas que en las bajas frecuencias. La Vía Láctea está «incandescente» a la luz de la radiación sincrotrónica. Las nubes visibles hoy en día que han quedado en la Vía Láctea de anteriores explosiones de supernova emiten también radiación sincrotrónica. Sabemos así que en ellas los electrones trazan espirales alrededor de campos magnéticos con una velocidad próxima a la de la luz.

La historia de Cygnus A

Yo no he conocido a Walter Baade, al contrario que los autores de la cita preliminar de este capítulo. Cuando él hizo irrupción en la historia de la radiofuente de la constelación del Cisne, yo hacía mis primeras experiencias en el observatorio más pequeño de Alemania como matemático recién graduado. Sólo puedo contar la historia desde fuera, por lo que luego me explicaron y por lo que he podido leer en la literatura.

Se dice que el interés por la astronomía suele comenzar en la pubertad y que quienes no pueden superarlo la escogen como profesión. Esto podría decirse en tono igualmente despectivo de muchos intereses científicos y técnicos. El hombre que debería descubrir la radiofuente del Cisne (Cygnus) había empezado en 1927, cuando tenía 15 años, como radioaficionado. Seguramente es de aquella época su interés por los contactos de radio a grandes distancias. Grote Reber nació en Wheaton, en el estado de Illinois. Se había matriculado hacía tiempo en la universidad cuando intentó enviar ondas de radio a la Luna con un emisor y receptor que él mismo se había construido, y captar las señales reflejadas. Su intento fue en vano. Lo conseguirían otras personas después de la II Guerra Mundial. Reber leyó los trabajos de Jansky y se decidió a los veintisiete años a construir un receptor para captar las ondas de radio de procedencia cósmica. Fue el primer radiotelescopio del mundo construido exclusivamente para fines astronómicos. El aparato, que tenía un diámetro de diez metros y que construyó en el patio trasero de

su casa, le costó unos 2.000 dólares. En aquella época trabajaba en una empresa de radio y tenía que recorrer cada día más de 40 km hasta Chicago. En octubre de 1938 pudo medir en una longitud de onda de 1,8 m la radiación del centro de la Vía Láctea descubierta por Jansky. Como les sucedió antes que a él a Herschel y a Hubble en el dominio de la luz visible y después de él a Baade, Grote Reber disponía en aquel momento del mayor radiotelescopio del mundo.

Con él encontró de nuevo el centro galáctico, y además varias nuevas fuentes. Una de ellas estaba situada en la constelación del Cisne, cuyo nombre latino es *Cygnus*. Pero su telescopio veía el cielo con poca precisión. Reber no podía saber con su antena si la fuente en el cielo era un punto o una mancha extensa. Para ello se necesitaban técnicas refinadas y mayores telescopios. Sin embargo, los siguientes progresos técnicos no se dirigieron hacia las radiofuentes cósmicas, sino a la técnica bélica, pues cuando Reber descubrió la fuente del Cisne la II Guerra Mundial estaba desde hacía tiempo en plena marcha.

Un año antes de que Reber iniciara en el patio trasero de su casa la construcción del su telescopio, un físico de veintitrés años. Reginald V. Jones, se ocupaba en Inglaterra de la radiación en el dominio infrarrojo (ver la pág. 22). En 1934, cuando no había decidido todavía su futuro profesional, su primera idea fue pedir una beca británica para el Observatorio de Monte Wilson e ir a California. Estaba pues a punto de convertirse en astrónomo, pero entonces Hitler inició el rearme de Alemania, y en Inglaterra creció el temor a los bombardeos aéreos. Jones decidió quedarse y poner sus conocimientos a disposición del gobierno, puesto que de noche pueden descubrirse los aviones enemigos gracias a su radiación infrarroja. Jones se convirtió en la persona más importante del espionaje científico durante la II Guerra Mundial: reconoció y estudió varios sistemas de radiolocalización de las escuadrillas de bombardeo alemanas sobre las Islas Británicas, investigó y observó las primeras pruebas alemanas con las llamadas armas de represalia VI y V2, y aconsejó varias veces personalmente a Churchill.

Mientras estudiaba el tema del sistema de radar alemán encontró en un documento interceptado y descifrado el nombre

«Würzburg», que sin duda era la denominación en código de un aparato de medida. Pronto Jones descubrió que se trataba de una antena de forma paraboloidal. Un paraboloide es una superficie en forma de ensaladera que da una parábola si se corta con un plano que contenga su eje. Las superficies de muchos «espejos cóncavos», de los espejos de los reflectores de coches, de los telescopios de luz visible y de los radiotelescopios astronómicos son paraboloides. La historia de la antena de radar alemana «Würzburg Riese» de la que se trataba nos distraería demasiado de nuestro tema actual. Está descrita con muchos detalles en los recuerdos de guerra de Jones[14]. La he citado porque después de Jansky y Reber la radioastronomía se aprovechó a fondo de la competencia técnica durante la Guerra. El «Würzburg Riese» se convirtió después de la II Guerra Mundial en una útil antena de radiotelescopio.

Los astrónomos que luego ayudaron a comprender la fuente del Cisne tuvieron sus primeras experiencias con la técnica de la alta frecuencia en la guerra. Uno de los radioespecialistas del equipo de Jones podía saber si una señal de radar procedía de una estación británica o alemana. Su nombre era Martin Ryle (1918-1984). En 1974 recibiría el premio Nobel de Física por sus contribuciones a la radioastronomía.

Mientras los cohetes alemanes V se erguían amenazadores en la costa del Canal, el cristalógrafo Stanley Hey se recicló en seis semanas y se convirtió en especialista de radio. Su tarea consistía en descubrir los cohetes alemanes poco después de su lanzamiento, enviando hacia ellos señales de radio que una vez reflejadas por los cohetes al elevarse serían captadas de nuevo. Se pensaba en la posibilidad que las débiles señales de regreso pudieran quedar eclipsadas por la radiación de Jansky procedente del Universo. Hey se ocupó de este problema y fue uno de los descubridores de la emisión de ondas de radio del Sol. Al finalizar la guerra llegó el momento de convertir las espadas en arados. Jones transportó material requisado hacia Inglaterra

---

[14] R. V. Jones, *Most Secret War.* Londres. 1978

para dedicarlo a fines pacíficos. El «Würzburg Riese» se transformó en un radiotelescopio. Un radioastrónomo de los tiempos pioneros en Cambridge me contó después de la guerra que los primeros radiotelescopios británicos se construyeron en su mayor parte con electrónica de guerra cogida a los alemanes. El grupo de Cambridge estaba bajo la dirección de Martin Ryle, el especialista de Jones para señales de radar. Una parte de los «Würzburg Riesen» se quedó en el continente, donde la radioastronomía holandesa bajo la dirección de Jan Oort en Leiden alcanzaría pronto un primer puesto mundial. Hendrik van de Hulst había allí predicho durante la misma guerra mundial la radiación del hidrógeno en los 21 cm. que luego se descubrió prontamente. Esta radiación permitió a los holandeses descubrir la estructura espiral de nuestro sistema galáctico. La pequeña Holanda se convirtió de repente en una potencia de la radioastronomía. En los primeros años de la posguerra la Vía Láctea perteneció a los holandeses.

En Inglaterra el cristalógrafo reciclado Key y dos colaboradores suyos investigaron después de la guerra con una antena de radar transformada en el dominio de los 64 MHz la fuente del Cisne descubierta por Reber. Los tres llegaron a la conclusión de que la mancha de radio del Cisne, que Reber no podía saber si ocupaba en el cielo una superficie grande o pequeña, debía ser muy pequeña.

Dieron el siguiente paso, en Australia, los radioastrónomos John Bolton y Gordon Stanley. La radioastronomía se estaba convirtiendo paulatinamente en la designación de una profesión. Estos científicos utilizaron en 1948 un radiotelescopio cerca de Sidney situado sobre una escollera con el cual se podía captar tanto la radiación directa de la fuente como la reflejada sobre la superficie del mar. Veremos luego que dos telescopios situados a una cierta distancia pueden conectarse para poder «ver» con mayor precisión en el dominio de radio. Los australianos, que sólo disponían de un telescopio, utilizaron la superficie del mar como segunda superficie de captación. Con esta técnica refinada pudieron descubrir que la fuente del Cisne tiene en el cielo como máximo un diámetro de ocho minutos de arco, es decir, una cuarta parte del diámetro de la Luna llena.

Parecía pues que la fuente era un punto o por lo menos una mancha muy pequeña en el cielo.

En el año 1951 F. Graham Smith, que trabajaba en el grupo de Ryles en Cambridge, pudo determinar con precisión la posición de la fuente en el cielo. Utilizó para ello dos grandes antenas parabólicas. A fines de agosto de 1951 Baade recibió en California una carta de Smith desde Cambridge con la posición exacta de la fuente. Había llegado el momento de dirigir el espejo de 5 m de Monte Palomar a la fuente y ver lo que allí se veía. El siguiente período de observación que tenía Baade con el espejo empezó el 4 de septiembre. Hizo dos fotografías de la región indicada por Smith, una en el dominio azul de la luz visible, la otra en el dominio rojo. Al día siguiente reveló él mismo las placas. «Comprendí inmediatamente que tenía ante mi algo fuera de lo corriente. Había galaxias distribuidas por toda la placa, más de 200», dijo Baade más tarde. «La más brillante estaba en el centro de la placa. Parecía deformada por fuerzas de marea, por la atracción gravitatoria entre dos núcleos. No había visto nunca nada semejante. Estaba tan sumido en mis pensamientos que cuando salí a cenar tuve que detener el coche camino de casa para pensar.»

El aspecto de la galaxia le hizo creer que estaba viendo el choque de dos Universos islas.

Baade y el astrónomo de Princeton Lyman Spitzer habían pensado ya lo que pasaría al chocar dos galaxias de un cúmulo. Las masas gaseosas interestelares de ambas galaxias se calentarían al entrar en contacto. Quizás emitirían ondas de radio. Baade creyó que se encontraba ante una colisión de este tipo.

La teoría de las galaxias en colisión convenció a muchos astrónomos. Llegaron nuevas informaciones sobre Cygnus A, como se llamó entonces a la radiofuente. Los astrónomos del radioobservatorio de Jodrell Bank, un radiotelescopio móvil con un espejo parabólico de 76 m de diámetro construido mientras tanto cerca de Manchester, descubrieron que no se trataba de *una* sino de *dos* radiofuentes muy próximas una a otra. La radiofuente Cygnus A es en realidad una fuente doble. Luego se descubrieron en lugares distintos del cielo otras radiofuentes intensas. Eran generalmente galaxias que radiaban. Muchas de

ellas no pertenecían a cúmulos galácticos en las que pudiera esperarse una colisión, sino que estaban abandonadas y solitarias. No podía pensarse que hubiesen chocado con ninguna galaxia más y la teoría de las galaxias en colisión se archivó.

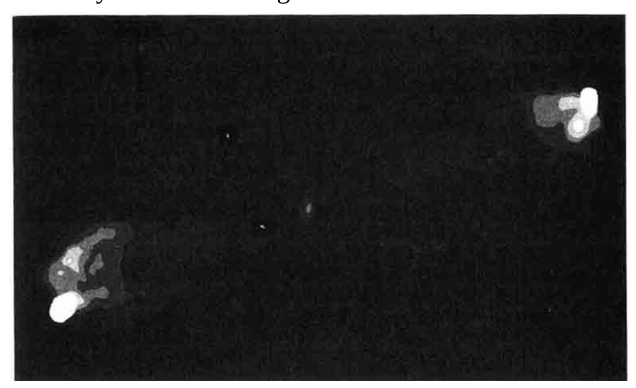


Fig. 10-4. Las dos manchas de radio de Cygnus A (según H. van der Laan). La pequeña mancha situada aproximadamente en el centro entre las dos manchas de radio, es la galaxia descubierta por Walter Baade. La estructura de la figura es muy pequeña en el cielo, y el disco de la Luna llena representado a la misma escala tendría un diámetro de 1,5 m.

Baade había descubierto exactamente la galaxia correspondiente a Cygnus A. Tenía un aspecto algo extraño, pero no se trataba de dos Universos islas chocando el uno con el otro. El objeto se aleja de nosotros a 16.800 km/s, como pronto constató Rudolf Minkowski, un astrónomo de Hamburgo que había emigrado de Alemania en los años treinta. Según la ley de Hubble la radiogalaxia estaba a 336 Mpc de distancia, casi cinco veces más lejos que el cúmulo de Virgo. A pesar de esta distancia, su radiación sólo es superada por la del centro galáctico y por la de otra nube explosiva situada en nuestra Vía Láctea, fruto de una antigua supernova, es decir, por fuentes que parecen intensas porque están muy próximas a nosotros.

Pronto se vio por los espectros que la radiación de la fuente del Cisne es sincrotrón, es decir, emitida por electrones que se

mueven con enorme rapidez en un campo magnético. El astrofísico Geoffrey Burbidge, que trabajaba entonces en Inglaterra, calculó en 1958 la energía que contienen los electrones y los campos magnéticos de la fuente. El resultado es increíble. El lector quizá recuerde que en la bomba de Hiroshima se convirtió totalmente en energía un gramo aproximado de materia (ver la pág. 45). Para generar la energía almacenada en la fuente del Cisne, deberían transformarse íntegramente en energía un millón de masas solares.

Al parecer hay en Cygnus A una central de energía de un tipo cuya existencia los astrofísicos no habían hasta entonces sospechado.

Radiogalaxias

Se conocen actualmente muchas galaxias que emiten intensamente en el dominio de radio, y en comparación con ellas las galaxias normales como la nuestra o la nebulosa de Andrómeda no emiten prácticamente nada en este dominio. Estas galaxias, como Cygnus A, hacen notar su presencia como potentes emisores, aunque su distancia sea tan grande que su imagen óptica se haya hecho invisible. Puede incluso esperarse que los radioastrónomos descubran radiogalaxias incluso cuando su distancia sea tan grande que ya no pueden percibirse ópticamente. Pero muchas radiofuentes se han identificado con galaxias visibles. Cuando mejoraron los radiotelescopios se pudo determinar con mejor precisión de qué punto concreto nos llega la radiación de una radiogalaxia. Se tuvo entonces la sorpresa que ya hemos citado al hablar de Cygnus A: las radiogalaxias son fuentes dobles. En muchos casos la radiación no llega de la misma galaxia, sino del espacio vacío próximo a ella. Sin duda llegan ondas de radio directamente del lugar donde está situada la galaxia correspondiente a Cygnus A, pero la mayor parte llega de dos regiones como manchas de radio situadas a ambos lados de la galaxia y a unos 50 kpc de su centro. Así pues, ambas manchas distan entre sí cuatro diámetros de nuestra galaxia Vía Láctea (fig. 10-4).

Pronto se comprobó que esto era lo corriente en las radiogalaxias. Sus ondas de radio proceden de regiones que parecen vacías. ¿Podían las galaxias haber arrojado algo que se había hecho invisible pero que continuaba activo en las proximidades de ella y que radiaba? La radiación de las manchas dobles de radio es radiación sincrotrón, por lo tanto en los lugares ocupados por las esferas proyectadas por la galaxia hay campos magnéticos y electrones de rápido movimiento. La intensa radiación recibida de unas esferas donde no hay otra cosa obliga a preguntarse cómo es posible que haya allí electrones rápidos emitiendo continuamente a pesar de que su misma radiación debería ir frenando su movimiento. ¡El problema es más excitante todavía!

En algunas galaxias se han descubierto no dos sino cuatro esferas radiantes. Es evidente que las dos exteriores fueron arrojadas por la galaxia mucho tiempo antes que las otras dos. Es sorprendente de todos modos que la galaxia haya proyectado el segundo par de nubes en las mismas direcciones opuestas que el primero. Entre ambos fenómenos debieron transcurrir largos períodos de tiempo durante los cuales la galaxia tuvo que haber «anotado» estas direcciones.

¿De dónde sacan las esferas radiantes de las galaxias sus enormes energías, que les permiten radiar con tanta intensidad, quizá durante millones de años después de haber escapado al espacio vacío desde su galaxia madre? ¿Por qué les siguen marcando el paso detrás suyo otras esferas arrojadas después? Dos jóvenes teóricos de Cambridge (Inglaterra). Roger Blandford y Martin Rees, dieron el primer paso hacia la solución. Blandford enseña actualmente en el California Institute of Technology de Pasadena, California, y Rees ostentaba ya entonces la famosa cátedra Plumian de la Universidad de Cambridge. Cuando aún era joven había sucedido en esta cátedra al gran Fred Hoyle.

Ambos predijeron que las esferas se mantenían vivas gracias a chorros delgados de materia de gran energía que les proporcionaban continuamente energía de la galaxia madre, del mismo modo que un avión puede aprovisionar a otro en el aire mediante una manguera delgada. Más tarde hablaremos del modelo Blandford-Rees. Lo importante aquí es que los chorros

delgados predichos por los astrofísicos de Cambridge se descubrieron poco después.

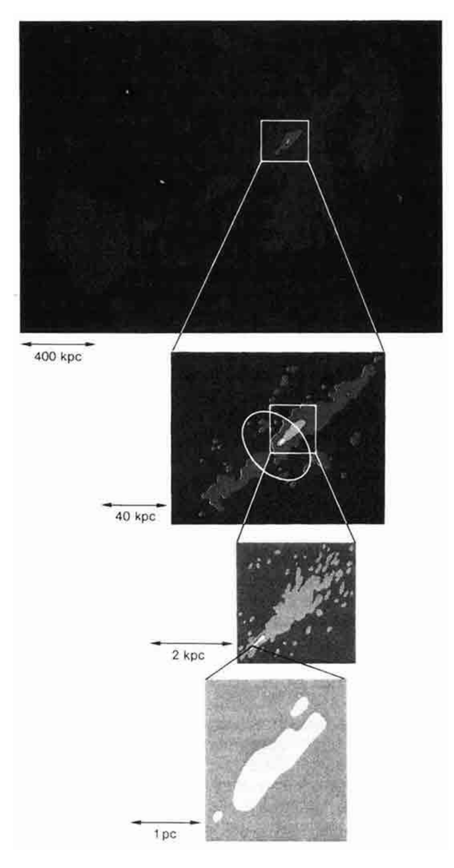


Fig. 10-5. Estructura fina en las proximidades de la radiogalaxia NGC 315. La figura superior muestra una imagen completa de radio con las dos manchas de radio arriba a la derecha y abajo a la izquierda. La galaxia en si está en el centro de la figura. Se observa ya un rayo que va de la galaxia a la mancha de arriba a la derecha. La segunda figura parcial muestra la región central ampliada ocho veces. Salen de la galaxia dos rayos delgados hacia arriba a la derecha y hacia abajo a la izquierda. La línea ovalada reproduce el borde de la galaxia en el dominio visible. Con un nuevo aumento de veintiséis veces (tercera figura parcial) se observa lo fino que es el rayo que sube hacia arriba a la derecha. El dibujo inferior muestra finalmente con una ampliación de 1.600 veces la estructura alargada del rayo, cuyo diámetro es aquí menor que un pc. Al lado de cada dibujo hay intervalos que señalan las distancias reales. Obsérvese que el último dibujo parcial está ampliado 330.000 veces en relación al primero (según K. I. Kellermann y 1.1. K. Pauliny-Toth).

Unos chorros, llamados *jets*, salen realmente de las galaxias en dos direcciones opuestas, y captamos de ellos ondas de radio. Las grandes estructuras permiten reconocer también las dos direcciones señaladas por los chorros en las proximidades inmediatas de la galaxia. Los dos chorros diminutos, cuyas dimensiones se miden en parsecs, se prolongan luego en las estructuras grandes, que pueden extenderse por centenares de kpc (figura 10-5). La fuente de las dos gigantescas banderas radiantes que ondean en el espacio a ambos lados de la galaxia, está situada en su centro. También el rayo delgado que se observa en luz visible saliendo del centro de la galaxia M87 en el cúmulo de Virgo (fig. 1-3) coincide con un chorro de ondas de radio.

Las banderas radiantes de gran longitud que se adentran en el espacio permiten reconocer que la dirección en la que la radiogalaxia proyecta los campos magnéticos y los electrones rápidos no cambia con el tiempo. Las galaxias tienen buena memoria. Siempre que la forma plana de la galaxia o las bandas de polvo de su plano central permiten reconocer su rotación, las esferas radiantes parecen emitidas en ambas direcciones a lo largo del eje de rotación.

Se han descubierto así galaxias que en luz visible no presentan nada notable. No parece que se distingan de las demás. Sin embargo, arrojan paralelamente a su eje de rotación materia de alta energía, de tanta energía que las ondas de radio emitidas por la masa en movimiento son tan intensas como la radiación de nuestra Vía Láctea en todas las longitudes de onda. Ni la nebulosa de Andrómeda ni nuestra propia galaxia presentan tal actividad.

El modelo del tubo de escape doble

Al parecer salen de las galaxias chorros de gas delgados y de gran energía. Son chorros que comparados con las dimensiones de la galaxia recuerdan agujas delgadas. Los únicos chorros delgados de gas o de líquido que conocemos salen de una tobera. ¿Pero dónde hay una tobera en una galaxia, dónde están

sus paredes firmes, capaces de concentrar el gas en movimiento y de crear un chorro delgado? No hay nada allí que tenga el menor parecido con las paredes de una tobera, y que además pueda mantenerse constante durante millones de años de modo que los chorros salgan en la siguiente inyección en las mismas direcciones.

Ésta era sólo una de las preguntas, y se planteaban otras. ¿De qué parte de la galaxia procede la energía que se genera concentrada en un espacio estrecho? ¿Dónde se oculta la central de energía que de un dominio espacial que como máximo tiene unos parsecs de diámetro saca tanta potencia como toda una galaxia gigante? Supongamos que tuviéramos la fuente de energía y que dispusiéramos de dos toberas para arrojar el material hacia fuera. ¿Por qué se mantiene coherente el chorro a distancias de megaparsecs sin expandirse en el espacio vado del exterior de la galaxia, ni vaporizarse? ¿Qué mantiene unido el chorro tanto tiempo después de abandonar las toberas de su galaxia?

El modelo que Blandford y Rees han imaginado se llama *modelo del tubo de escape doble*. Sus dos creadores suponen que en la región central de una galaxia hay una potente fuente de energía. Sale de ella materia caliente parecida a la radiación cósmica de nuestra galaxia Vía Láctea, es dear, una mezcla de núcleos atómicos y de electrones que se alejan unos de otros con movimiento caótico y velocidad próxima a la de la luz. Alrededor del centro se forma una especie de burbuja de gas caliente (fig. 10-6). Las partículas chocan con el gas normal de la galaxia, que está atravesado como el gas de la nuestra por campos magnéticos. Los dos componentes gaseosos, el gas exótico y caliente del centro y el gas frío e inofensivo de la galaxia, apenas se mezclan. El gas caliente intenta presionar y apartar el gas frío para abrirse camino. Cuando la región central proporciona más gas caliente, continúa empujando hacia fuera. Si la región central expulsa más gas caliente, éste presionará aún más hacia fuera. La burbuja de gas del centro, en continuo crecimiento, ha de abrirse camino al exterior sea como sea. Esto lo consigue en el lugar más fácil, en las direcciones de menor resistencia, es decir, en los dos lados por donde la salida del

centro es más corta. El gas caliente abre dos canales en el gas frío y relativamente denso, a través de los cuales escapa. Ambos canales están en la dirección del eje de rotación. El gas forma por sí solo su propia tobera (fig. 10-6).

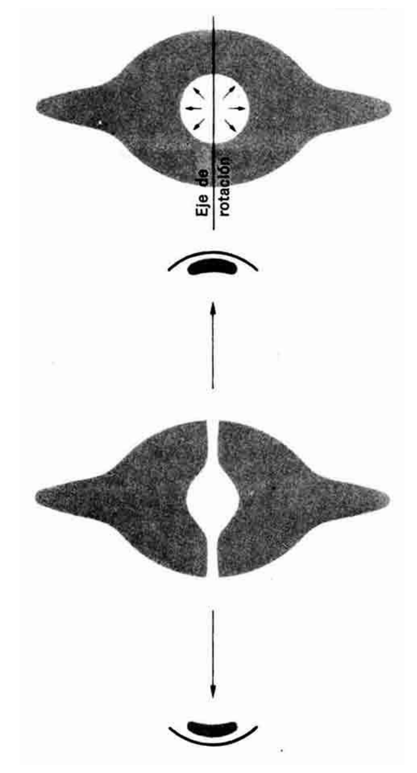


Fig. 10-6. El modelo del tubo de escape doble de Blandford y Rees. En la región central de una galaxia se libera energía y se forma una burbuja de gas caliente que intenta expandirse (arriba). Abajo: el gas caliente ha abierto dos canales y brota ahora con gran velocidad en forma de dos chorros paralelos al eje de rotación. Los chorros al chocar con el gas en reposo de la materia intergaláctica muy rarificada liberan radiación en el dominio de radio. El centro de la galaxia aprovisiona de energía continuamente las dos radio- fuentes situadas a una cierta distancia de la galaxia madre (en el dibujo inferior arriba y abajo de la galaxia).

El proceso recuerda un fenómeno que puede observarse cuando hierve un caldo. En el fondo de la olla la temperatura es superior a la de las capas superiores y en el agua del caldo se forman burbujas de vapor que abren sus propios canales hacia arriba. Desde arriba se ve abrirse en la superficie del caldo pequeños agujeros a través de los cuales escapa el vapor formando un rayo delgado.

Mediante cálculos de computador puede seguirse la evolución del gas caliente cuando se abren los dos canales de escape en la galaxia, y su comportamiento es el indicado. Blandford y Rees han acertado realmente con su modelo. ¿Pero de dónde proceden las dos esferas radiantes? Sabemos que el espacio intergaláctico no está totalmente vado y que el gas que sale a gran velocidad ha de chocar con las masas gaseosas que ocupan este espacio. Allí el gas que sale con gran velocidad de las toberas galácticas se frena. Su energía cinética debe radiarse y el gas emite su energía principalmente en el dominio de radio.

Parece que esto explique que las esferas radiantes continúen emitiendo a pesar de haber abandonado hace tiempo su galaxia. Dos chorros delgados de partículas calientes y muy enérgicas salen de la galaxia madre y proporcionan energía a las nubes de radio.

Ahora ya no es de extrañar que la radiogalaxia sepa en qué dirección proyectó las nubes por última vez. Cuando el núcleo produce una segunda esfera gaseosa que pugna por salir, sopla de nuevo en las dos direcciones en las que la galaxia es más delgada. Estas direcciones corresponden a las del eje de rotación, que es fijo en el espacio. Se crean de nuevo dos chorros gaseosos que llegan al exterior a través de dos canales y cuyas masas gaseosas emisoras vuelan hacia fuera en las mismas direcciones que sus predecesoras. De este modo se forman las banderas radiantes.

Por esclarecedor que sea el modelo, quedan todavía muchas cuestiones por resolver. El modelo no explica por qué el núcleo genera en un pequeño espacio grandes energías. Observaciones modernas presentan los jets como agujas agudas de diámetros inferiores a 1 pc (fig. 10-5). Pero esto significa que en el interior de la galaxia debe existir ya una diminuta tobera. ¿Existen

quizás en las radiogalaxias dos pares de toberas, dos toberas muy finas en el centro, y más hacia fuera, en direcciones opuestas, las toberas de Blandford-Rees? ¿Tenemos un nuevo indicio de que suceden cosas extraordinarias en un espacio muy reducido del centro de la galaxia?

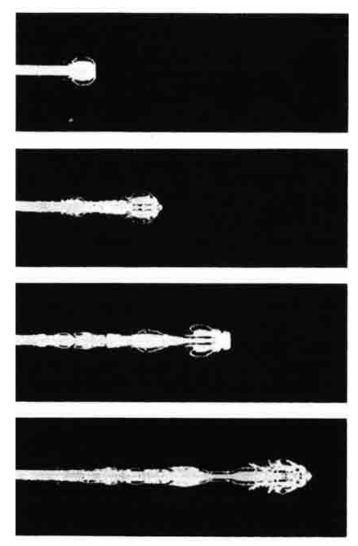


Fig. 10-7. Chorros emitidos desde el interior de una galaxia calculados en computador por M. Norman, L. Smarr y K.-H. Winkler. Se supone que la galaxia está a la izquierda del borde izquierdo del dibujo, con su eje de rotación horizontal. El chorro emitido está representado en cuatro fases distintas de su evolución. Mientras avanza cada vez más hacia la derecha, adentrándose en el espacio exterior a la galaxia, no se ensancha sino que se mantiene estrecho.

Lo lógico sería que cada chorro después de abandonar la galaxia que lo comprime se mezclara con el gas enrarecido del espacio exterior. El gas debería expandirse muy rápidamente y mezclarse en remolinos con el entorno. En cambio las observaciones de radio muestran chorros muy delgados que apenas se expanden al aumentar su distancia de la galaxia madre. Este problema parece hoy en día resuelto en principio. En verano de

1981 Michael Norman, Larry Smarr y Karl-Heinz Winkler simularon en el gran computador de nuestro instituto de Munich una corriente gaseosa de este tipo saliendo de una galaxia al gas enrarecido de su entorno. Los chorros no se expandían en el exterior y mantenían su pequeño diámetro (fig. 10-7).

La explicación está relacionada con un conocido fenómeno. Si una piedra, es decir, un cuerpo de densidad relativamente elevada, se introduce en el agua y se suelta, obedecerá la gravedad y se hundirá. Pero si tiramos casi horizontalmente una piedra plana a gran velocidad a lo largo de la superficie del agua, ésta forma para la piedra una pared bastante dura. La piedra es rechazada continuamente hasta que su velocidad ha disminuido tanto que obedece la gravedad y se hunde.

Los cálculos de computador confirman el mismo efecto. El chorro sale disparado a tal velocidad de la galaxia, que el gas circundante forma para él una pared dura. Las pequeñas esferas gaseosas que se aventuran indiscretamente fuera del chorro reciben en seguida un fuerte golpe y son rechazadas con violencia hacia su chorro de origen.

Galaxias renacuajo y antenas compuestas

No todas las galaxias son tan simétricas como Cygnus A, que ha soplado sus esferas radiantes simultáneamente y en direcciones opuestas. Un 30 por ciento de las radiofuentes galácticas tienen una estructura más complicada. En un cúmulo galáctico de la constelación de Perseo hay dos objetos notables. Este cúmulo no es tan rico como el de Virgo. Sólo se reúnen en él 500 galaxias. Su velocidad de recesión es de 5.400 km/s, lo que, según la ley de Hubble, permite deducir una distancia de 108 Mpc. Entre las galaxias de este cúmulo hay dos radiogalaxias que no presentan dos esferas radiantes en lados opuestos sino unas colas emisoras de radio algo torcidas (fig. 10-8), cada una de las cuales contiene nudos. ¿A qué se debe la estructura irregular de estas colas? Se cree por una parte que las galaxias se mueven en el gas del cúmulo. Vimos ya (pág. 192)

que en las regiones centrales de los cúmulos galácticos se concentra gas. Los dos chorros gaseosos de las galaxias, emitidos en direcciones opuestas, se retrasan quizás en el gas circundante, como penachos de humo. Por otra parte, los chorros de gas proyectados no exactamente en línea recta pueden dar lugar a torcimientos aparentes, quizá semejantes a los de la figura 10-8. Estos objetos, llamados *galaxias renacuajo* por su forma, no se distinguen de las demás radiogalaxias, pero se mueven en el gas de un cúmulo galáctico y dejan tras de sí una estela radiante.

La figura 10-8 se basa en mediciones efectuadas por el radiotelescopio de Westerbork, en el noreste de Holanda. Este telescopio está formado por doce antenas individuales de 25 metros de diámetro cada una, situadas a lo largo de un tramo de 1,6 km de longitud e interconectadas electrónicamente. El conjunto de antenas se puso en marcha en 1970. Se utiliza principalmente para investigar las radiogalaxias y la radiación de otras galaxias que son emisoras muy mansas, como la nuestra y la nebulosa de Andrómeda.

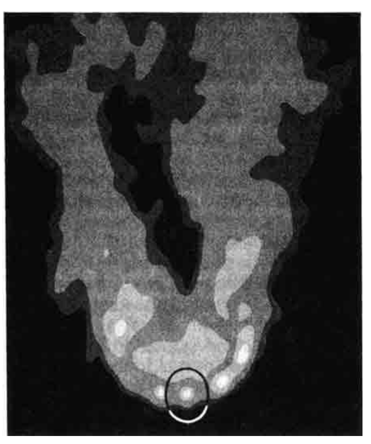


Fig. 10-8. La galaxia renacuajo NGC 1265 según mediciones de radio efectuadas por K. Wellington, H. van der Laan y G. K. Miley. La línea ovalada reproduce el borde de la galaxia en el dominio visible.

Este telescopio explota un truco especial al cual recurre con frecuencia la radioastronomía. Cuanto mayor es la superficie receptora de un telescopio, tanto si es óptico como de radio, más puede recibir y más débiles son las fuentes de radiación que pueden captarse con él. Pero las grandes superficies de apertura tienen otra ventaja.

Cuanto mayor es el diámetro de la superficie de captación de un telescopio con mayor precisión puede ver. Esto está relacionado con la naturaleza ondulatoria de la radiación. En principio con el espejo de 5 m no pueden verse separadas en luz visible dos estrellas si su distancia es inferior a tres centésimas de segundo de arco. Este es el ángulo con que vemos los ojos de una persona situada a 600 kilómetros de distancia. Si se mira a esta distancia un rostro humano con el espejo de 5 m no podrán reconocerse muchos detalles. Con un telescopio más pequeño sería peor. Cojamos unos prismáticos. En principio a unos 6 kilómetros de distancia ya no puede reconocerse un rostro humano, por bien talladas que estén sus lentes.[15] Con longitudes de onda superiores a las de la luz la visión es menos definida. Si un radiotelescopio tiene una superficie de captación de sólo cinco metros de diámetro y utiliza una longitud de onda de un metro, sólo podrá separar dos radiofuentes que disten en el cielo por lo menos 13 grados. Se obtiene esta distancia juntando 26 diámetros de Luna llena. Los telescopios pequeños ven así de mal. Los primeros radiotelescopios de la posguerra eran ya de mayor tamaño, y esto era bueno. Trabajaban con longitudes de onda mayores, y esto era malo. Podían dar la posición de Cygnus A con una precisión equivalente a la anchura de la mano extendida. Hay un truco para ver mejor con el telescopio, es decir, para mejorar su resolución sin tener que construir un telescopio mucho mayor. Se utilizan dos o más superficies receptoras situadas a una distancia determinada. Tomemos como ejemplo dos pequeñas antenas de radio sepa-

[15] Nos referimos aquí a las condiciones de observación óptimas. En la atmósfera terrestre las imágenes pierden precisión debido a las perturbaciones del aire, tanto con el espejo de 5 m como con los prismáticos.

radas diez metros, conectemos las señales que recibe y observemos una radiofuente con este telescopio compuesto. Conseguirá la misma resolución que con una superficie de antena de diez metros de diámetro. Como es lógico, no capta tanta radiación como la antena mayor, pero la «nitidez» es la misma. El telescopio de Westerbork utiliza este sistema. Las doce antenas ven con la misma nitidez (es decir, con la misma resolución) que un telescopio gigante cuya superficie de captación tuviera un diámetro de 1,6 km.

Se siguió también este sistema después de la guerra en el telescopio de la escollera, en Australia (ver la pág. 264). En lugar de dos superficies de captación se utilizó una y se recurrió a la superficie reflectante del océano para que formara la segunda superficie de captación.

En los últimos años se ha mejorado notablemente la resolución conectando de modo refinado radiotelescopios de América, Europa y la Unión Soviética. Con esta técnica se puede ver con tanta nitidez como si se dispusiera de un radiotelescopio con una superficie de captación equivalente al diámetro de la Tierra. La figura 10-5 se obtuvo con radiotelescopios distribuidos por el mundo. Se descubrió así un fenómeno notable: los chorros delgados que salen proyectados de las radiogalaxias. Todavía no sabemos si comprendemos este fenómeno de modo acertado, pero volveremos al tema en el capítulo siguiente.

La radioastronomía nos ha revelado nuevas propiedades de las galaxias. Sabíamos ya que las galaxias existían y los límites del Universo accesible a la observación estaban fijados por las posibilidades de fotografiar galaxias con nuestros telescopios. Casi todas ellas están a menos de 1.300 Mpc. Nuestro Universo antes del año 1963 estaba formado por galaxias hasta donde podía observarse. Entonces se descubrieron objetos totalmente nuevos, situados a mucha mayor distancia en el espacio. Podemos captar estos objetos hasta distancias de más de 5.000 Mpc. El Universo accesible a nuestras observaciones aumentó de tamaño y los radioastrónomos fueron los impulsores del descu-

brimiento de este nuevo tipo de astros. Era evidente que se había dado con un fenómeno que superaba en mucho a todo lo que hubiera podido imaginar nuestra fantasía más desbocada.

XI. LOS MISTERIOSOS QUASARES

> Creo que fue principalmente el genio de Hoyle quien propuso la idea muy atractiva... de que en el caso presente los teóricos relativistas con sus alambicados trabajos no sólo son ornamentos magníficos de nuestra cultura, sino que quizá tienen una utilidad real para la ciencia... Sería una vergüenza que enviáramos a todos los relativistas a casa.
>
> THOMAS GOLD, conversación informal con ocasión de la primera Conferencia de Texas, 1963

Dallas, Texas, diciembre de 1963. Habían pasado unas pocas semanas desde el asesinato del presidente Kennedy. Nos encontrábamos en una sala de conferencias, a sólo unos centenares de metros del lugar del trágico suceso. Robert J. Oppenheimer, conocido por su participación en el desarrollo de la bomba atómica durante la II Guerra Mundial, dirigió el congreso, al que se había invitado astrofísicos de todo el mundo. Se quería discutir un descubrimiento sensacional en el que habían desempeñado de nuevo un papel importante astrónomos californianos.

Puede decirse, visto con perspectiva, que hasta aquella conferencia de Texas la imagen del Universo que tenían los astrónomos estaba más o menos en orden. Desde luego no se entendía todo, ni mucho menos, pero se tenía la sensación de que ya no podían esperarse del Universo más sorpresas grandes.

Sea lo que fuere lo que provoca la expansión del Universo, no había ninguna duda sobre qué es lo que se aleja de cada punto en el espacio. Se trata de las galaxias, conjuntos de estrellas. No se sabía exactamente por qué generaban a menudo un maravilloso dibujo espiral al girar sobre sí mismas. Pero parecía como si con las galaxias las cosas siguieran normalmente su camino. Era sólo cuestión de que lo esclareciera todo la mecánica, quizá la hidrodinámica. Quizá la solución del problema

no sería fácil, pero las leyes de la física conocida bastaban perfectamente para la empresa.

Las mismas estrellas, los componentes esenciales de las galaxias, no daban tampoco motivos de excesiva preocupación. Se sabía más o menos cómo se formaban las galaxias a partir de masas de gas y de polvo. Se sabía que en su interior tenían lugar reacciones nucleares y que al final de sus vidas se transformaban de algún modo en objetos bastante aburridos, muchas veces se transformaban probablemente en las llamadas enanas blancas, de las cuales hay muchos ejemplos en la Vía Láctea. Se sabía también que la vida de una estrella acaba a menudo en una explosión. Estas explosiones todavía no se comprendían, pero podían observarse de vez en cuando directamente en las galaxias.

Todo esto creaba la impresión de que la física clásica y la mecánica cuántica bastarían para comprender el Universo tal como lo vemos actualmente. Sólo en el caso de las manchas de radio que se observan a ambos lados de algunas galaxias se iba todavía a tientas y en la oscuridad. Pero nadie sospechaba que una rama tan exótica de la física como la teoría general de la relatividad llegara a entrar algún momento en acción para explicar los fenómenos de las galaxias.

Para conseguirlo bastaría con ocuparse algo más de sus núcleos, por ejemplo del chorro que brota del centro de la galaxia de Virgo (fig. 1-3). Mucho tiempo antes, el astrónomo armenio Viktor A. Ambarzumian había señalado que en los núcleos de algunas galaxias tenían lugar cosas extraordinarias. Tampoco se había prestado mucha atención hasta entonces a las galaxias Seyfert con sus núcleos brillantes que para estos objetos parece que son más importantes que los brazos espirales que los rodean. En aquel entonces gozaba de mucho prestigio la teoría de un Universo que en conjunto debía mantenerse idéntico, la teoría del Universo estacionario de Bondi, Gold y Hoyle, que atribuye al Universo una cierta tranquilidad. ¿Vivimos realmente en un Universo bastante aburrido, que desde luego todavía no conocemos completamente, pero que no permite albergar grandes esperanzas de recibir sorpresas en el futuro? Este idilio de los astrónomos se hundió en 1963.

Reordenación de las radiofuentes

Las galaxias como Cygnus A que presentan a menudo en el dominio de radio una potencia de emisión mucho mayor que nuestra Vía Láctea en luz visible, hacían pensar que todavía podían darse sorpresas. Aumentó progresivamente el número de radiofuentes gracias a la mejora de los métodos radioastronómicos. Martin Ryle y sus colaboradores habían comenzado en Inglaterra en los años cincuenta la confección de catálogos de radiofuentes para tener una visión de conjunto. Las fuentes son a menudo galaxias con radiación sincrotrón o nebulosas gaseosas de nuestra Vía Láctea, que emiten radiación térmica en el dominio de radio. Pero en aquella época no se sabía exactamente la posición de muchas fuentes debido a la mala resolución de los telescopios de entonces.

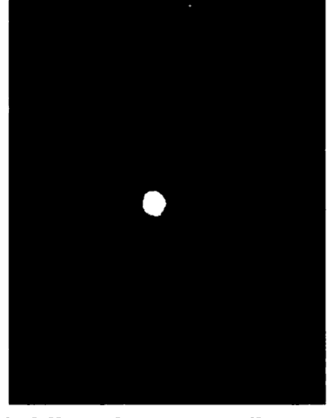


Fig. 11-1. La «radioestrella» 3C48 (centro de la figura) apenas se distingue en esta fotografía de las estrellas normales. Un estudio más detallado revela una débil estructura fibrosa. Al parecer se trata de masas gaseosas emitidas al exterior. (Fotografía: Palomar Observatory.)

En el año 1959 se confeccionó el llamado tercer catálogo de Cambridge, catálogo que se haría famoso. Se había determinado en la frecuencia de 159 MHz la posición de 471 radiofuentes con una precisión de 1/6 a 1/3 del diámetro de la Luna llena. Los radiotelescopios para «ver» con mayor precisión necesitaban técnicas más costosas (ver la pág. 216). Estas técnicas se emplearon con algunas de estas fuentes. En el año 1960 se había precisado con tanta exactitud la situación en el cielo de la fuente número 48 del catálogo que pudo relacionarse con

un objeto estelar en las fotografías astronómicas (fig. 11-1). Para designar una fuente del tercer catálogo de Cambridge se antepone 3C a su número de catálogo. Se trata pues en este caso de la fuente 3C48. Más tarde conoceremos la famosa fuente 3C273.

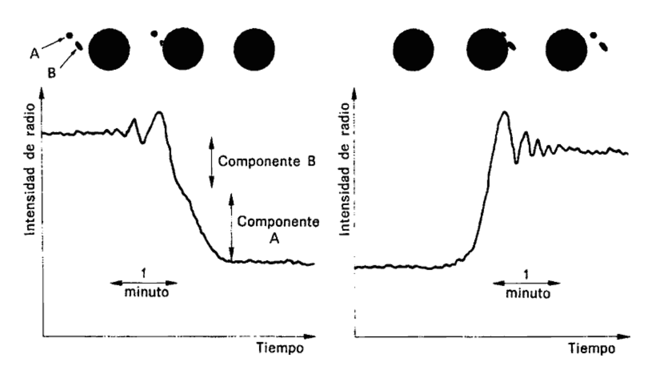


Fig. 11-2. Luminosidad en el dominio de radio de 3C273 durante su ocultación por la Luna. Arriba están representadas las radiofuentes formadas por las componentes A y B y el disco lunar en fases distintas de la ocultación. Debajo están los cambios en la intensidad de las ondas de radio registrados al desaparecer y reaparecer la fuente. En la ocultación las dos componentes desaparecen individualmente detrás del borde lunar, y la disminución de la intensidad de radio tiene lugar en dos pasos. En la reaparición, el borde de la Luna y las dos componentes están orientados entre sí de tal modo que las dos fuentes emisoras reaparecen casi simultáneamente y la subida tiene lugar en un paso.

Allan Sandage presentó un informe en 1960 al Congreso de la Sociedad Astronómica Americana sobre el objeto de aspecto estelar 3C48, que había estudiado junto con otros astrónomos. Se contaba entre ellos el espectroscopista Jesse L. Greenstein, que procedía de la escuela de Shapley en Harvard. La fuente 3C48 pareció tan misteriosa a los cinco autores, que no se sintieron con suficiente seguridad para publicar nada al respecto. No pudieron ni siquiera decidirse a enviar a la Sociedad un resumen escrito para las actas del congreso. Por ello actualmente sólo tenemos de la conferencia que dio entonces Sandage una

noticia aparecida en 1961 en la revista popular norteamericana Sky *and Telescope.*

Pronto pudieron identificarse varias radiofuentes del catálogo con objetos de aspecto estelar. Si hasta entonces se habían descubierto ondas de radio procedentes de galaxias o nebulosas gaseosas de nuestra galaxia, de repente aparecían objetos que eran sin duda estrellas. Se las llamó *radioestrellas.* ¿Existen estrellas que emiten ondas de radio? Nuestro Sol emite desde luego en el dominio de radio, pero nosotros sólo captamos su radiación porque lo tenemos muy cerca. Sus ondas de radio observadas a una distancia de algunos kpc ya no serían medibles.

Estrellas, como nadie había visto todavía

¿Qué son pues las radioestrellas? Cuando el astrónomo que trabaja con luz visible quiere saber algo sobre una estrella toma su espectro. No fue fácil conseguir un espectro de 3C48, se necesitó un tiempo de exposición de siete horas con el espejo de 5 m de Monte Palomar. Las estrellas normales presentan un espectro continuo (ver la pág. 36). En algunas longitudes de onda hay además emisiones marcadas, en otras hay marcadas absorciones. Normalmente, a partir de las longitudes de onda de estas líneas de emisión y de absorción puede descubrirse el tipo de átomo de la materia emisora. El espectro de 3C48 mostraba un continuo y seis líneas de emisión. Ninguna de ellas pertenecía a un elemento conocido. Desde hace tiempo nos hemos acostumbrado a que la luz, aunque llegue de los rincones más alejados del Universo, proceda en definitiva de átomos bien conocidos. Ninguna estrella había presentado en su espectro líneas que no pudiéramos atribuir a elementos químicos conocidos. En cambio en este caso se tenían líneas que no correspondían a ninguno de los átomos conocidos. Cuando se tomaron espectros de otras radioestrellas también éstos mostraron líneas de origen desconocido. Los espectros de las distintas radioestrellas no tenían nada en común, y nadie había visto nunca nada semejante. La radiación continua que llegaba tanto en el dominio de radio como en el de la luz visible, era radiación

sincrotrón, lo cual ya indicaba que se tenía entre manos algo exótico. La radiación sincrotrón es emitida por electrones extremadamente rápidos. Pero las líneas de emisión eran incomprensibles. La solución del enigma llegó a principios de 1963. Nos ayudó a dar el salto la Luna, aunque no tuviera ninguna relación con los objetos.

La Luna, al moverse alrededor de la Tierra, cubre las estrellas que hay detrás. Las estrellas desaparecen en el borde oriental y reaparecen al cabo de un tiempo en el borde occidental. El 5 de agosto de 1962 y poco después el 26 de octubre la Luna ocultó la radiofuente 3C273. Cuando la fuente desaparece detrás de la Luna, se apaga la radiación, cuando la Luna deja de ocultarla reaparece. Cyril Hazard, M. Brian Mackey y A. John Shimmins, de Australia, siguieron con un radiotelescopio la ocultación de la fuente por la Luna (fig. 11-2). Observaron que la radiofuente estaba formada en realidad por dos componentes, que entraban uno siguiendo al otro detrás de la Luna. La ocultación por la Luna permitió determinar también la posición de la fuente, que el holandés Maarten Schmidt, que trabajaba en los Montes Wilson y Palomar, consiguió identificarla con una estrellita del cielo, de la cual sale un rayo delgado como una aguja (figura 11-3). Recuerda al rayo agudo que sale del centro de la galaxia M87 de Virgo (fig. 1-3). Allan Sandage había visto ya con el espejo de 5 m objetos fibrosos y delgados alrededor de 3C48 y de otras radioestrellas. Ahora 3C273 mostraba un rayo muy bonito, que sale de un objeto de aspecto estelar. Ambos objetos, el rayo y el objeto de aspecto estelar, emiten ondas de radio y son las dos componentes que se descubrieron en la ocultación lunar. Schmidt tomó un espectro de la componente de aspecto estelar. Se veía de nuevo radiación continua con algunas líneas de emisión que no correspondían a ningún átomo conocido. Pero 3C273 desempeñaría en el desciframiento del enigma de las radioestrellas el mismo papel que la famosa piedra de Rosetta en el desciframiento de los jeroglíficos.

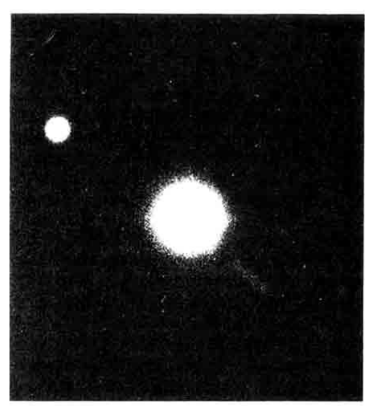


Fig. 11-3. Fotografía en luz visible de 3C273. La imagen puntiforme en la placa fotográfica está tan aumentada que la fuente de aspecto estelar se convierte en una mancha blanca y se distingue la granulación de la placa. Sin embargo, se ve el rayo delgado dirigido hacia abajo a la derecha. La fuente puntiforme y el rayo corresponden a las dos radiofuentes de la figura 11-2. (Fotografía: Palomar Observatory.)

La velocidad de recesión de las radioestrellas

Maarten Schmidt trabajó durante semanas sobre el espectro de 3C273, lo estudió continuamente y lo enseñó a sus colegas. No parecía que las líneas tuviesen ningún sentido. Un día notó una especie de regularidad que se le antojaba familiar. Y de pronto lo entendió: ¡eran las líneas de elementos muy normales pero desplazadas extraordinariamente hacia el rojo! Si este desplazamiento de las líneas de emisión hacia el extremo rojo del espectro se debía al efecto Doppler, como el desplazamiento hacia el rojo de los espectros de las galaxias, el objeto estelar se alejaba de nosotros ¡con una velocidad de 45.000 km/s!

Cuando Slipher, antes de la I Guerra Mundial, había determinado que la velocidad radial de la nebulosa de Andrómeda era de 300 km/s, pensó que un objeto de velocidad tan grande no podía pertenecer a nuestra galaxia. Los movimientos que llevan a cabo en relación unas con otras las estrellas de nuestro sistema son reducidos. Ahora en cambio se tenía una velocidad

de 45.000 km/s en un cuerpo celeste que en el telescopio parecía una estrella inofensiva. Era difícil imaginar a una estrella atravesando con tal velocidad nuestra galaxia.

Cuando se hubieron comprendido las líneas de emisión de 3C273, no costó nada interpretar las de 3C48. Aquí el resultado fue todavía más excitante: el objeto se alejaba de nosotros a 110.000 km/s, una tercera parte de la velocidad de la luz. Si las velocidades de fuga se atribuyen al movimiento de expansión del Universo, como en las galaxias, se deduce, por la ley de Hubble, que 3C273 con una velocidad de 45.000 km/s ha de estar a 900 Mpc de nosotros, entre las nebulosas espirales más lejanas. La fuente 3C48 estaría entonces a una distancia de 2.200 Mpc, es decir, mucho más lejos que todas las galaxias conocidas hasta entonces.

La interpretación de las líneas de emisión de los espectros de los quasares tal como la describimos aquí parece dominada por una cierta arbitrariedad, como si se considerara una cierta línea simplemente como la línea muy desplazada hacia el rojo de un elemento conocido. Esta línea podría considerarse por ejemplo como una línea del hidrógeno desplazada hacia el rojo o como una línea desplazada del carbono. En ambos se obtendrían velocidades de fuga muy distintas. Si sólo se viera una línea, esto sería desde luego cierto. Pero los espectros contienen varias líneas de emisión. Hay que poder considerar desplazadas hacia el rojo con igual intensidad no una única línea, sino *todas*. Es decir, todas ellas deben ser líneas de elementos atómicos conocidos y frecuentes en el Universo, desplazadas por el efecto Doppler debido a la velocidad de fuga de la «radioestrella».

Si las radiofuentes que se acaban de descubrir estaban situadas muy lejos de nosotros en el espacio y a pesar de esta gran distancia sus ondas de radio y su luz visible eran todavía perceptibles para nosotros, su potencia de emisión debía ser muy grande. Tenían que brillar cien veces más que una galaxia entera. Hoy conocemos un objeto que se aleja de nosotros con un 92 por ciento de la velocidad de la luz. ¡Esto corresponde a una distancia de 5.520 Mpc! Si se nos permite considerar el desplazamiento de las líneas de emisión de los espectros de los

nuevos objetos como una consecuencia de la expansión del Universo y deducir de ella distancias tan enormes, entonces las «radioestrellas» no pueden ser estrellas reales. Tenemos ante nosotros un tipo totalmente nuevo de astro, comparable más bien a una galaxia entera, pero que emite con mayor intensidad. Sin embargo, en el telescopio estos cuerpos aparecen como puntos, y a simple vista no pueden distinguirse de las estrellas de nuestra galaxia. Por ello recibieron el nombre de «radiofuentes casi estelares». En la conferencia de Dallas el astrónomo de Taiwan Hong-Yee Chiu, que trabajaba con la NASA en Nueva York, propuso en su conferencia lo siguiente: «Hasta ahora hemos utilizado la complicada expresión "radiofuentes casi estelares" para referirnos a estos objetos. Puesto que no conocemos su naturaleza, es difícil encontrar una denominación corta y adecuada, de modo que el nombre refleje sus propiedades más importantes. Voy a utilizar para simplificar la abreviatura "quasar"». Desde entonces llevan estos objetos dicho seudónimo, con el cual se han popularizado. He visto relojes de cuarzo y tipos de barco de vela que ostentan la marca «Quasar».

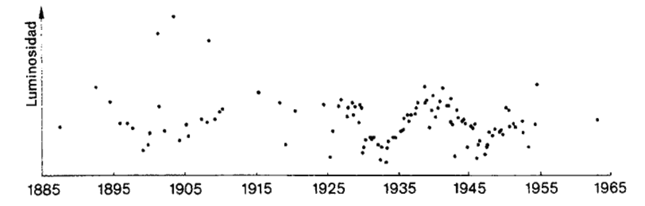


Fig. 11-4. Oscilaciones de luminosidad que ha presentado en luz visible durante este siglo el quasar 3C273. Hacia arriba está representada la luminosidad del objeto de aspecto estelar. Una subida hacia arriba de 17 mm corresponde a la duplicación de la luminosidad.

También la distribución de los quasares en el cielo permite reconocer que no pertenecen a nuestra Vía Láctea y que están en el espacio exterior. Los quasares parecen evitar la banda de la Vía Láctea, igual que las galaxias. Su luz en la dirección donde se ve el disco de la Vía Láctea es absorbida por las masas

de polvo interestelares. La mayoría de los quasares se ven mirando por encima del disco.

¿Por qué causó tanta sorpresa que los nuevos objetos sólo formaran puntos en el cielo y no manchas extensas de luz? Al fin y al cabo están más lejos y por lo tanto deben aparecer más pequeños que objetos grandes pero más próximos. Pronto se descubrió que los quasares son en realidad objetos pequeños, mucho más pequeños que las galaxias. Inmediatamente después de que se identificara ópticamente 3C273 se buscaron en los archivos astronómicos las viejas placas de la correspondiente región de cielo, se buscó la estrella y se siguió su comportamiento en el pasado. De nuevo ayudó Harvard en la tarea. Se vio que la luminosidad de la estrella había oscilado en el pasado. En ocasiones su luminosidad se duplicaba en menos de un mes (fig. 11-4). Ésta parece ser una propiedad muy general de los quasares. En el quasar 3C279, descubierto mucho después, se ha observado hace poco que su luminosidad en 40 días se multiplicaba por veinticinco. Los cambios en la luminosidad de los quasares se deben a la variabilidad de la radiación continua. En las líneas de emisión no se ha descubierto hasta ahora variación temporal clara. Sabemos ya (fig. 9-7) que la velocidad con que varía la intensidad de una fuente de radiación nos informa sobre su tamaño. Sea lo que fuere la causa de la luz, la fuente no puede ser mucho mayor que el trayecto que recorre la luz en 40 días. Un mes luz es una distancia pequeña comparada con nuestra galaxia Vía Láctea. La luz tarda cien mil años en recorrer su disco. Un mes luz es más comparable con las dimensiones de nuestro Sistema Solar. Corresponde aproximadamente a 132 radios orbitales de Plutón, nuestro planeta más exterior. Tenemos en los quasares objetos con una potencia equivalente a la de 100 galaxias que procede de un dominio espacial cuyo diámetro corresponde aproximadamente a una décima parte de la distancia media entre dos estrellas de una galaxia, y posiblemente el dominio es todavía inferior. Nuestra Vía Láctea está en la misma proporción con un quasar que un campo de fútbol con un grano de arena de su interior. ¡Y de este grano de arena quasar llega cien veces más energía que de todo el campo de fútbol Vía Láctea! Recordemos que también

los núcleos brillantes de las galaxias Seyfert presentan oscilaciones de luminosidad muy rápidas que permiten deducir dimensiones espaciales reducidas para estos objetos brillantes y puntiformes (ver la pág. 186). Al parecer los quasares y los núcleos de las galaxias de Seyfert tienen mucho en común. ¿Son quizá los quasares núcleos de galaxias, galaxias situadas tan lejos en el espacio que sólo vemos sus núcleos de aspecto estelar? Hemos descubierto los quasares gracias a las ondas de radio que emiten, pero al parecer hay muchos objetos semejantes de los cuales no recibimos ondas de radio. Estos quasares «mudos» muestran los mismos espectros que los «auténticos», con líneas de emisión desplazadas hacia el rojo.

¿Están realmente los quasares a tanta distancia?

Los quasares no nos plantearían tantos enigmas si no estuvieran a distancias tan grandes. Por ello se ha puesto en duda una y otra vez que el desplazamiento hacia el rojo de sus líneas de emisión esté relacionado realmente con la expansión del Universo. Pero a pesar de múltiples intentos no se ha llegado a ninguna explicación alternativa.

Lo que nos da quebraderos de cabeza es la enorme potencia radiada que debe salir de tales objetos si están a tanta distancia como indica su desplazamiento hacia el rojo y la ley de Hubble. Si quisiéramos obtener esta radiación con estrellas como el Sol amontonadas en un espacio tan pequeño se necesitarían diez billones de soles, es decir, cien veces más estrellas que las existentes en la Vía Láctea.

¿Durante cuánto tiempo emite un quasar con esta inimaginable intensidad? Podemos evaluarlo en el caso de 3C273. El rayo delgado está a unos 150.000 años luz de la fuente principal. Puesto que el rayo no puede alejarse del núcleo a una velocidad superior a la de la luz, el objeto entero debe tener por lo menos 150.000 años de edad. Si hay estrellas allí cuya radiación se alimenta como el Sol de la transformación de hidrógeno en helio, durante este intervalo se han debido quemar más de

diez millones de masas solares. Todo sería más simple y menos potente, si los quasares estuvieran más cerca de nosotros.

Unos cuantos quasares están en cúmulos galácticos y tienen el mismo movimiento de fuga que las galaxias del cúmulo. Esto apoya la idea de que los quasares participan en el movimiento de fuga de las nebulosas espirales, y que su desplazamiento hacia el rojo debe explicarse mediante el efecto Doppler.

Los quasares están muy lejos en el espacio, y algunos de ellos son los objetos más lejanos que conocemos. Tengamos en cuenta lo siguiente: casi todas las galaxias que conocemos actualmente están a menos de 1.300 Mpc, algunas están más lejos, hasta 5.000 Mpc, y el quasar más lejano está a mucho más de 5.000 Mpc. Su luz ha estado pues en camino durante más de 16.000 millones de años. Cuando se emitió aparecieron los primeros objetos de la Vía Láctea, los cúmulos globulares. El descubrimiento de los quasares ha multiplicado el espacio del cual recibimos luz. Quien quiera saber algo sobre la estructura a gran escala de nuestro Universo deje de lado las galaxias y dediqúese a los quasares. Por desgracia, la cosa no es tan fácil. Todavía sabemos demasiado poco sobre ellos.

Martin Rees y Dennis Sciama llevaron a cabo en Inglaterra un intento de este tipo: saber algo sobre el Universo basándose en los quasares. Estudiaron cómo aumenta con la distancia el número de quasares. Dedujeron la distancia de las velocidades radiales medidas y de la ley de Hubble. La teoría del Universo estacionario hace predicciones precisas sobre el crecimiento con la distancia del número de objetos distribuidos uniformemente en el espacio. Rees y Sciama descubrieron que en realidad hay más quasares lejanos de lo que permite la teoría del Universo estacionario. El descubrimiento de los quasares había inclinado el fiel de la balanza hacia el lado de la gran explosión primigenia.

Sin embargo, los quasares no parece que están a distancias arbitrariamente grandes. Apenas hay algunos situados a tal distancia que su velocidad de fuga supere el 85 por ciento de la de la luz, o sea a 5.000 Mpc. Al mirar en la distancia miramos simultáneamente hacia el pasado del Universo. A una distancia

superior a los 5.000 Mpc miramos al parecer una época en la que los quasares no debieron haber nacido todavía (ver también la fig. 12-4).

¿Un agujero negro en el quasar?

En principio podemos explicar la potencia emitida por los quasares suponiendo diez billones de estrellas semejantes al Sol comprimidas en un núcleo de un mes luz de diámetro, pero nos enfrentamos con nuevas dificultades. Si están apretadas tantas estrellas en un espacio tan reducido, la gravedad en las proximidades se hace tan grande que todos los procesos físicos siguen un curso distinto del acostumbrado. Para comprenderlo mejor volvamos al Universo dimensional de los hombres planos, porque la curvatura del espacio tiene de nuevo en ese problema un papel esencial.

Supongamos que el Universo sea un plano y olvidemos la posibilidad de la esfera y de la silla de montar. Supongamos que el Universo sea euclidiano, que la suma de los ángulos de grandes triángulos sea, como debe, de 180 grados. Vimos ya que esto sólo podía ser válido de modo aproximado. Los hombres planos habían descubierto que el espacio alrededor de todos los cuerpos que ejercen una atracción gravitatoria sobre los objetos vecinos está ligeramente curvado, incluso que esta curvatura de la superficie cósmica es equivalente a la gravitación. Era claro por lo tanto que la superficie cósmica, que en general es plana, está ligeramente curvada en los puntos que contienen masas. Observemos desde fuera el efecto de la curvatura de la superficie cósmica debida a la fuerza de atracción de una estrella. En la figura 11-5a vemos el efecto de lado y podemos reconocer la curvatura. En la figura ll-5b, donde se ve la superficie desde arriba, está representada la ligera desviación debida a la fuerza de atracción que sufre un rayo de luz al pasar cerca de una masa.

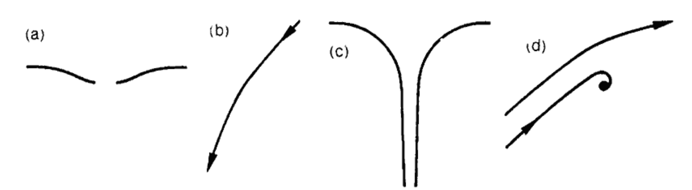


Fig. 11-5. Un agujero negro en el mundo plano, (a): Un cuerpo (plano) del Universo plano (visto de lado desde fuera de la superficie cósmica de los hombres planos) abomba la superficie. Un rayo de luz que pasa cerca de este cuerpo se desvía, como aparece representado en (b) visto desde arriba del Universo plano. Sí el cuerpo tiene una densidad suficiente, es decir, cuando hay concentrada una gran cantidad de materia en un espacio pequeño, el Universo plano se deforma formando un tubo, como vemos de lado en (c). Tenemos así un agujero negro en el Universo plano. Los rayos de luz que pasan a una distancia prudente se desvían (d), los que se le acerca acaban atrapados irremisiblemente y ya no emergen más. También la materia que se acerca demasiado al agujero negro desaparece en él y no vuelve a salir más.

Si aumentamos la masa de las estrellas sin cambiar su radio, es decir, si aumentamos su densidad, la curvatura se hace más pronunciada y la desviación de la luz más intensa. Podríamos creer que el proceso seguirá igual: la densidad algo mayor, la curvatura algo más intensa, la desviación por lo tanto más pronunciada. Pero el panorama pronto cambia abruptamente. A partir de una determinada densidad todo cambia. Si observamos de lado y desde fuera veremos que la concavidad se convierte de repente en una punta de longitud infinita que se proyecta desde la superficie cósmica (fig. 11-5c.) Un rayo de luz que se aproxima demasiado al cuerpo denso es capturado y ya no sale más de allí (fig. 1 l-5d). Pero no sólo los rayos de luz sino también cualquier cuerpo que se adentre demasiado en el campo gravitatorio de nuestra estrella no podrán salir y se hundirá en su interior, aumentando todavía más la masa de la estrella. Volvamos ahora a nuestro mundo cotidiano tridimensional.

Intentemos comprimir la mayor cantidad de materia posible en el centro de una galaxia o en algún otro lugar del espacio, quizás los diez billones de soles de los que hablábamos hace

poco. Comprimamos primero las estrellas en una esfera de 1 kpc de diámetro. La gravedad en el espacio exterior es ya muy grande, pero todavía no pasa nada especial.

Sabemos, gracias a Albert Einstein, que un rayo de luz en las proximidades de nuestro supercúmulo estelar se curvará ligeramente, porque su gravedad lo desvía. Einstein predijo en 1915 la influencia de la gravedad sobre la propagación de la luz. Se observa este fenómeno en la luz estelar que llega a la Tierra después de pasar rozando el Sol. El Sol actúa como una lente. El campo estelar ante el cual se mueve aparece algo ampliado. Pero el efecto es muy pequeño, está casi en el límite de nuestros instrumentos de medición, y sólo puede observarse cuando el disco solar queda tapado por la Luna en un eclipse total de Sol, de modo que las estrellas se hacen visibles en pleno día. Durante los pocos minutos que dura este espectáculo de la naturaleza puede medirse la curvatura de los rayos luminosos prevista por Einstein. Se ha comprobado que la desviación producida por el Sol es la que prevé la teoría de la relatividad. El efecto de la desviación de la luz por la gravedad desempeña un papel importante cuando comprimimos en un espacio cada vez más reducido las estrellas de nuestro supercúmulo estelar.

Supongamos que pudiéramos seguir este proceso. Un rayo de luz que pase por las proximidades del supercúmulo se curvará claramente hasta que se haya alejado lo suficiente de la región de gravedad intensa, y luego continuará su camino por el Universo en línea recta. Si seguimos comprimiendo el cúmulo estelar, la gravedad se hará más intensa. Pronto la luz se curvará tanto, que un rayo de luz próximo al objeto casi le dará la vuelta antes de escapar al Universo. Si las estrellas del supercúmulo estelar están más comprimidas todavía, ya nada podrá salir de las proximidades inmediatas al exterior. Incluso los rayos de luz que se emiten desde la superficie directamente hacia fuera vuelven a caer inexorablemente al supercúmulo.

Alrededor de nuestro objeto se cierra un horizonte que no deja escapar ninguna luz al exterior.

Un objeto así recibe en astrofísica el nombre de *agujero negro*[16]. La misma naturaleza de un agujero explica que no pueda verse. Sin embargo, muchos astrofísicos creen que estos agujeros existen en la naturaleza. Se sospecha que los quasares albergan agujeros negros. ¿Por qué? Intentemos comprimir en un reducido espacio los diez billones de soles que nos gustaría tener para explicar la potencia radiada por los quasares. El efecto de la gravedad sobre la propagación de la luz resulta ya muy intenso si nuestro supercúmulo estelar tiene un diámetro de tres años luz. Mucho antes de que podamos comprimirlo hasta la esfera deseada de un mes luz, el supercúmulo se habrá convertido en un agujero negro (fig. 11-6).

Parece como si no fuera posible explicar mediante un conjunto de estrellas caseras las fuentes de energía de los quasares. Cuando se intenta reunir en un espacio suficientemente pequeño una cantidad suficiente de estrellas, se choca con efectos extremos de la teoría general de la relatividad. Pero si se llega al problema de los agujeros negros puede intentarse la solución con ellos. De hecho los agujeros negros constituyen un medio ideal para emitir energía. Esto parece paradójico. Vimos en efecto que todo lo que se acerca al agujero es absorbido inexorablemente y se hace invisible para un observador exterior. ¿Cómo podría explicar un agujero negro la enorme potencia radiada por los quasares?

---

[16] No deja de ser cómico que los astrónomos, que se ocupan casi exclusivamente de fenómenos celestes, se encuentren hoy con que una de sus principales concepciones pueda interpretarse de diferente manera. Los astrónomos franceses se sirven preferentemente de la expresión mucho más atractiva de «astres occlus» (astros ocluidos). Cuando pudo demostrarse que de un agujero negro no pueden salir líneas de campo magnético, algunos astrónomos ingleses dijeron que «un agujero negro no tiene pelo» y hablaron más bien de «un principio de censura cósmica».

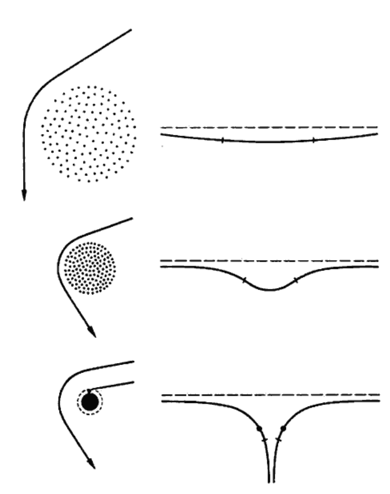


Fig. 11-6. Intento de reducir un supercúmulo estelar a una masa de un mes luz de diámetro. Arriba a la izquierda: la luz se desvía en las proximidades de un cúmulo estelar de diez billones de masas solares. El espacio circundante está deformado, como aparece a la derecha en analogía al Universo superficial de la figura 11 -5. Los trazos pequeños en la superficie cósmica indican los límites del cúmulo estelar (plano). Centro: Hemos aumentado la densidad del cúmulo estelar, con lo que la desviación de la luz en las proximidades de su borde es más intensa (izquierda) y la curvatura del espacio mayor (derecha). Antes incluso de que el cúmulo estelar se haya contraído a un mes luz, aparece un agujero negro. Abajo a la izquierda: La luz y la materia que penetran en el espacio limitado por una línea circular de trazos ya no pueden salir. Debajo a la derecha está representado el agujero negro del Universo superficial. Los dos puntos negros indican los lugares de la superficie cósmica, dentro de los cuales todo queda atrapado. Los dos trazos transversales marcan la superficie del cúmulo estelar atrapado en el agujero negro.

La materia antes de caer en el agujero negro adquiere una gran velocidad. Cuando cae en el agujero negro esta velocidad se acerca a la de la luz. Antes de que desaparezca bajo el horizonte del agujero negro, la materia se calienta y emite energía hacia fuera. Quien quiera disponer pues de una fuente intensa de radiación necesita sólo un agujero negro y echar materia en

su interior. Basta echar materia a un ritmo de una masa solar por año para que la energía liberada y emitida hacia fuera cubra las necesidades de radiación de un quasar. Una masa solar por año no es mucho. Al fin y al cabo las galaxias están formadas por centenares de miles de millones de masas solares. Si el quasar estuviera situado en el centro de una galaxia que nosotros no podemos ver debido a su gran distancia, y de la cual sólo percibimos el brillante núcleo del quasar, dispondríamos de suficiente materia para alimentar el agujero negro. No es preciso que el agujero devore estrellas enteras. Las estrellas pierden siempre materia hacia el espacio; también sobre la Tierra sopla continuamente el viento solar. Esta materia que arrojan las estrellas podría quizás acumularse en el centro de la galaxia y alimentar el agujero negro.

Si un quasar radia desde hace un millón de años, el agujero negro de su centro debería haberse tragado por lo menos un millón de masas solares. Un agujero negro así tendría un diámetro de diez segundos luz.

Los observatorios de rayos X en órbita alrededor de la Tierra que permiten observar el cielo en la longitud de onda de los rayos X han aportado dos contribuciones importantes al tema. En 1978 se descubrió que la luminosidad en rayos X del núcleo de una galaxia Seyfert cambiaba en un intervalo de 100 segundos, y en 1980 se observó un quasar cuya emisión de rayos X oscilaba dentro de 200 segundos. Sabemos que cuanto más rápida es la oscilación de la radiación de una fuente, más pequeña debe ser (fig. 9-7). La luz en el dominio óptico permitía calcular para la radiación continua del quasar un diámetro máximo de un mes luz. Ahora estamos en el dominio de unos cuantos cientos de segundos-luz. Esto corresponde a unos centenares de diámetros solares, a sólo una millonésima de parsec, un tamaño muy pequeño comparado con el de una galaxia. No es de extrañar que la radiación de un quasar en el dominio de los rayos X oscile más rápidamente que en el dominio visible. Cuando la materia cae en un agujero negro alcanza su mayor temperatura poco antes de desaparecer en él. Y la materia radia en el dominio de los rayos X precisamente a altas temperaturas. Los rayos X llegan pues de las proximidades inmediatas del

agujero negro. Las rápidas oscilaciones de la radiación hacen suponer la existencia de agujeros negros en los quasares y posiblemente en los núcleos de algunas galaxias, quizás incluso en los de todas ellas. La materia que cae en el agujero negro no desaparece totalmente de nuestro Universo. Continúa luego haciéndose notar gracias a su gravedad, aunque no pueda emitir ya hacia fuera más señales luminosas.

¿Es ésta la explicación de todos los procesos de gran energía que tienen lugar en los centros de las galaxias? Quizá la central de energía en el corazón de las radiogalaxias es un agujero negro. Quizás los núcleos de las galaxias Seyfert extraen también su energía de estos objetos hambrientos, que reúnen materia y permiten como saludo de despedida a las masas gaseosas que caen en ellos emitir una parte considerable de su energía hacia fuera, antes de desaparecer en un «hasta nunca» auténtico como ninguno. Además, un agujero negro es mucho más generoso que una central de energía nuclear. Si se echa un gramo de hidrógeno en un agujero negro, se obtiene cinco veces más energía que transformándolo en helio dentro un reactor de fusión (que todavía no existe).

Se ha investigado recientemente la distribución de la luminosidad de la región más interior de la galaxia elíptica M87 de Virgo (fig. 1-3). Las fotografías normales no son adecuadas para la tarea, porque quedan sobreexpuestas en la región central. Se ha podido demostrar con una técnica especial que las estrellas ocupan el lugar con extraordinaria densidad. La gravedad parece ser de intensidad equivalente a la producida por la concentración en el centro de cinco mil millones de masas solares. ¿Existe en el centro de esta galaxia gigante un agujero negro, una fosa común en la que yacen miles de millones de estrellas? Del centro de esta galaxia sale un rayo delgado y brillante (fig. 1-3), parecido al que brota del quasar 3C273 (fig. 11-3). ¿Indica esto que tienen lugar los mismos procesos en los quasares y en los centros de las galaxias?

Las líneas de absorción de los quasares

Hasta ahora nos hemos ocupado principalmente de las fuentes de energía de los quasares. Pero sus espectros también nos dicen algo sobre la materia situada en las proximidades de su exótico interior. Es evidente que alrededor de la fuente central se encuentran masas de gas causantes de las líneas de emisión. Su composición química no es otra que la de la materia de estrellas muy normales, por ejemplo nuestro Sol. Un quasar, por exótico que sea, parece estar formado por materia familiar.

Se han descubierto con estudios espectroscópicos refinados líneas estrechas de absorción en los espectros de algunos quasares. Es evidente que las masas de gas que las crean no participan plenamente del movimiento de fuga del quasar y del gas que lo rodea; a menudo su velocidad es bastante más reducida, como si se movieran hacia nosotros vistas desde el quasar. ¿Son nubes frías que se interponen entre el quasar y nosotros? A menudo se descubren varios sistemas de líneas de absorción de este tipo en el espectro de un quasar, correspondientes a velocidades distintas (figura 11-7). Así, por ejemplo, puede verse en el espectro de un mismo quasar que la materia que crea un sistema de líneas de absorción se aleja del quasar con una velocidad de 100 km/s, mientras que otro sistema de líneas parece creado por materia que se aleja del núcleo del quasar acercándose a nosotros con una velocidad de 1.000 km/s. Las líneas de absorción oscuras deben proceder de materia más fría situada delante del quasar, como las líneas oscuras de Fraunhofer en los espectros de las estrellas creadas por materia más fría de sus atmósferas. ¿Por qué se aleja en nuestra dirección la materia causante de las líneas oscuras en los espectros de los quasares?

Hay dos explicaciones. Se sospecha por una parte que la región central del quasar expulsa continuamente nubes de gas que escapan en todas direcciones al espacio con velocidades distintas. Nosotros vemos los quasares a través de nubes que se acercan en nuestra dirección, las cuales imprimen en la luz de los quasares sus líneas de absorción.

Pero existe también otra interpretación según la cual la luz del quasar atraviesa con frecuencia galaxias en su trayecto hacia nosotros. Estas galaxias están más próximas y se alejan de nosotros con velocidades inferiores a las del quasar; por lo tanto, vistas desde el quasar se acercan a nosotros.

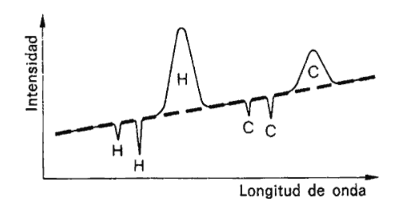


Fig. 11-7. Sección de un espectro de quasar (esquemática). La longitud de onda está representada hacia la derecha, hacia arriba la intensidad de la radiación correspondiente a cada longitud de onda. Trazos gruesos: radiación sincrotrón continua, a la cual en el dominio de longitudes de onda representado aquí se superponen dos líneas de emisión anchas. Proceden de los átomos de los elementos hidrógeno (H) y carbono (C). El efecto Doppler de estas líneas de emisión muy desplazadas hacia el rojo (derecha) nos da la velocidad de fuga del quasar. A la izquierda de cada línea de emisión hay dos líneas de absorción estrechas, debidas también al hidrógeno y al carbono. Están menos desplazadas hacia el rojo, por lo tanto están hacia el lado azul de las líneas de emisión (longitud de onda más corta). En el espectro representado aquí hay dos sistemas de absorción (cada línea de absorción está duplicada), que tienen distintos desplazamientos hacia el rojo.

Ambas explicaciones tienen sus pros y sus contras. Algunos de mis colaboradores y yo nos adherimos hace unos años en nuestro estudio a la primera interpretación, la basada en la escuela de Burbidge de California. Vimos que muchas propiedades de las líneas de absorción del quasar pueden explicarse suponiendo que las nubes son expulsadas al espacio por la presión de radiación de la intensa luz del quasar. He dedicado mucho tiempo a la elaboración de esta teoría, pero debo advertir que las ideas de la otra explicación, de la explicación por así decirlo «adversaria», siempre me han fascinado. Si las líneas de absorción proceden de galaxias situadas entre los quasares y nosotros, los quasares son sondas ideales para iluminar las

galaxias. Los quasares están tan lejos que su luz se emitió en una época en la que el Universo era todavía joven, por lo tanto la luz de los quasares debió iluminar las galaxias más lejanas en su fase juvenil o incluso en su mismo nacimiento. Pero de momento la controversia entre ambas escuelas no está decidida. Es posible que ambas tengan razón: en los espectros de los quasares se ven líneas de absorción de nubes expulsadas del núcleo y de galaxias colocadas delante a través de las cuales los observamos.

El enigma de las velocidades superiores a la de la luz

No sólo los sistemas de líneas de absorción oscuras de algunos quasares indican que escapa materia de ellos. Nos lo indica también el rayo que emite el quasar 3C273. Además se confirma con radiofuentes pequeñas situadas en las proximidades de los quasares. Así el quasar 3C345 tiene cerca suyo una radiofuente que se aleja de él. Con el método de los radiotelescopios distribuidos por toda la Tierra (ver la pág. 217) se ha descubierto que la distancia entre el quasar y el punto central de la fuente acompañante se desplaza cada año 0,17 milésimas de segundo de arco. Debe deducirse de ello que la fuente acompañante se proyectó al espacio a fines de los años sesenta. Voy a expresarme con mayor precisión. En aquella época el aspecto del cielo debió ser tal que la fuente acompañante procedía directamente del quasar. Puesto que éste se aleja de nosotros a 130.000 km/s, es decir, casi a la mitad de la velocidad de la luz, se deduce por la ley de Hubble que su distancia es de 2.600 Mpc, ¡es decir 8.500 millones de años luz! Por lo tanto, la nube debió ser proyectada mucho antes de que nacieran el Sol y la Tierra. Pero la noticia de que la fuente se ha separado del quasar ha llegado recientemente. Se ha hecho una observación parecida con el quasar 3C273 (fig. 11-8).

¿Qué valor tiene la velocidad con que se aleja la fuente acompañante de 3C345? Nosotros vemos la velocidad con que se separan ambos objetos en el cielo y conocemos gracias a la ley de Hubble la distancia que nos separa del quasar, y por lo

tanto podemos determinar la velocidad real. El resultado es penoso: la fuente se aleja del quasar en dirección lateral a una velocidad siete veces superior a la de la luz. Se ha calculado lo mismo con radiofuentes que parecen arrojadas de otros quasares o de radiogalaxias. ¿Expulsan materia de su interior los quasares y las radiogalaxias con velocidad superior a la de la luz? Esto contradice una de las leyes fundamentales de la física. Ni siquiera un quasar puede despedir un cuerpo con una velocidad superior a la de la luz, de modo que este cuerpo acabe alcanzando un rayo luminoso emitido con anterioridad. ¿Qué pasa con los quasares? ¿Ya no es válida allí la física, o en realidad 3C345 no está tan lejos? ¿Nos equivocamos al calcular la distancia de 2.600 Mpc, porque el desplazamiento de las líneas de emisión de los quasares no tiene nada que ver con el efecto Doppler?

Martin Rees ha dado la explicación más plausible. La observación de velocidades superiores a la de la luz es una ilusión. Rees afirma que en todos los casos en los que se han observado velocidades superiores a la de la luz la fuente fue arrojada de su quasar o de su galaxia con una velocidad próxima a la de la luz pero en *nuestra dirección.*

Nosotros observamos velocidades *superiores* a la de la luz. ¿Cómo puede aclarar Rees este hecho aduciendo velocidades que son *inferiores* a la de la luz? Recurriremos de nuevo a un sueño del señor Meyer. No es de fácil comprensión. Incluso el señor Meyer para poder interpretarlo tuvo que soñarlo varias veces.

El señor Meyer y los fuegos artificiales

El señor Meyer había oído por la tarde una emisión radiofónica de un conocido radioastrónomo de Bonn. La emisión había ya finalizado y sus pensamientos giraban todavía en tomo de radiotelescopios y radiogalaxias. De pronto se encontró en las calles de una ciudad forastera. Pero el país le resultaba conocido. Había estado allí recientemente con el señor

Tompkins. Estaba de nuevo en la ciudad donde la velocidad de la luz era baja.

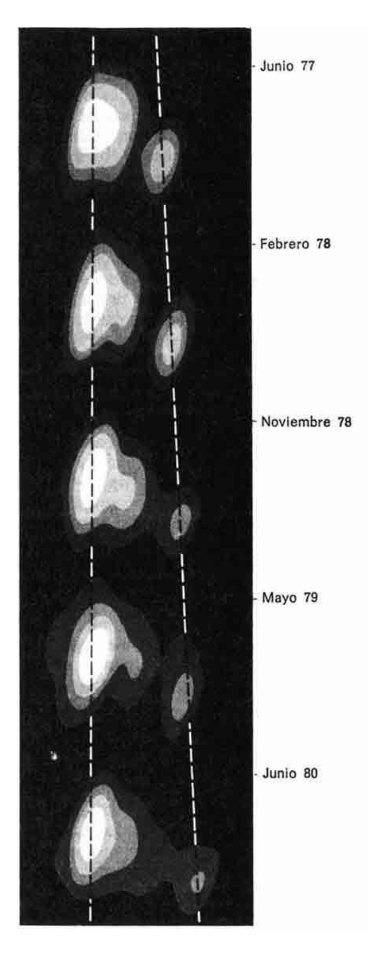


Fig. 11 -8. Velocidad superior a la luz de 3C273. Desde 1977 se aleja de este quasar un nudo de radio, que en la figura se mueve hacia abajo a la derecha. Su movimiento destaca gracias a las dos líneas de trazos que corren hacia abajo y que pasan por los centros del quasar y del nudo de radio. Obsérvese que el nudo está a sólo unas milésimas de segundo del quasar. El chorro de la figura 11-3, que puede captarse en luz visible y en el dominio de radio, está a una distancia mil veces superior, en la dirección de desplazamiento del nudo. Si se determina la distancia del quasar a partir del efecto Doppler de las líneas de emisión y de la ley de Hubble, parece que el nudo se separe del quasar con una velocidad diez veces superior a la de la luz (según T. J. Pearson y otros).

—Hola —oyó decir detrás suyo. Era Mr. Tompkins— Me alegro de que esté aquí. Pronto empezarán los grandes fuegos artificiales.

En el mismo instante subió al cielo una luz brillante, estalló y se separaron varias bolitas brillantes chisporroteando.

—La situación es aquí muy interesante —dijo Mr. Tompkins— puesto que las bolas de luz no pueden separarse con una velocidad superior a la de nuestra luz.

De nuevo subió a lo alto otro cohete. De un punto medio invisible volaban bolas luminosas en todas direcciones. De hecho todas se separaban con igual velocidad del centro de la explosión. El señor Meyer pensó que esto se debía por una parte a que las bolas eran proyectadas con fuerza igual y por otra a que todas ellas ya estaban próximas a la velocidad de la luz en aquella ciudad, que era reducida para nosotros.

La cosa sucedió con el tercer cohete. De nuevo se separaron las bolas rojas y amarillas con velocidad mutua casi igual, a excepción de la más brillante, la situada en el centro, de color azul. Era mucho más rápida y no voló muy lejos, pero podía verse claramente que recorría su trayectoria con una velocidad tres veces superior a la de las otras.

—¡Magnífica velocidad máxima! —gritó el Sr. Meyer— Una bola ha volado con velocidad triple. —Mr. Tompkins rió.

—Ya veo que no hace mucho que usted vive aquí. Esto sucede cuando los objetos se desplazan a una velocidad próxima a nuestra velocidad máxima, a nuestra velocidad de la luz. Se lo voy a demostrar.

Cogió una hoja de papel y empezó a explicarse.

—La bola que le parecía superrápida volaba en nuestra dirección -dijo.

—Tonterías —replicó el señor Meyer—. Voló transversalmente por el cielo. Si una bola se dirigiera exactamente hacia mí, yo debería verla inmóvil en el cielo y su brillo debería aumentar hasta que me diera en la cabeza.

—Pero la bola no voló exactamente en su dirección —respondió el señor Tompkins tomando de nuevo papel y lápiz.

Lo que dibujó está reproducido en la figura 11-9.

—La explosión tiene lugar en O. Usted, señor Meyer, es el observador M. Supongamos que el centro de la explosión esté a 100 metros de nosotros y que observamos una bola proyectada en nuestra dirección a 5,9 m/s. Tenga en cuenta que la bola

posee casi la velocidad local de la luz, que es de 6 m/s. Por lo tanto, va casi a nuestra velocidad máxima. Supongamos ahora que no se dirige exactamente hacia usted, sino que desde su punto de vista se desplaza algo de lado, de modo que caería en el suelo a 3 o 4 metros a su derecha si no se deshiciera antes de ello. —El señor Tompkins escribió en la trayectoria de la bola la letra K.

—Muy bien— dijo el señor Meyer— Supongamos que no me doy cuenta de que la bola venga hacia mí, sino que crea que se mueve transversalmente a mi visual. Primero la veo según la visual a, luego según la visual b.

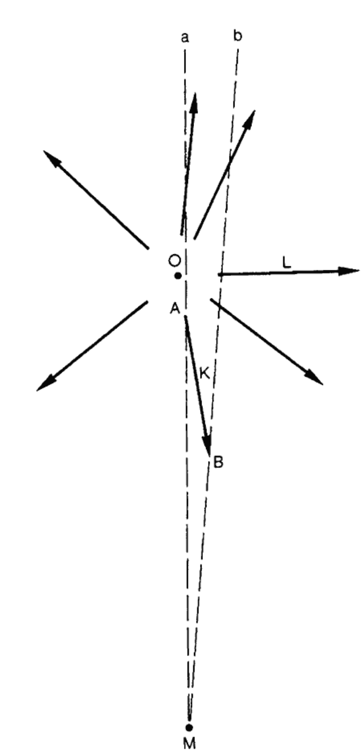


Fig. 11-9. El dibujo con el cual Mr. Tompkins y el señor Meyer discutieron la causa de una velocidad aparentemente superior a la de la luz. El texto explica los detalles correspondientes.

El señor Meyer dibujó estas dos direcciones como rectas de trazos.

—Debería entonces tener la sensación de que se mueve mucho más lentamente que las demás bolas, puesto que no puedo reconocer su movimiento principal en dirección hacia mí. Si la velocidad real de la bola es de 5,9 m/s, tengo la sensación de que se aleja con una velocidad de... —y tomando papel y lápiz continuó diciendo—: Se mueve a la derecha a sólo 21 cm/s. Con esto no puede usted explicarme por qué veo la bola a mayor velocidad.

El señor Meyer estaba convencido de que tenía razón, pero Mr. Tompkins sonrió.

—En un instante determinado vio la bola en la dirección a. Al cabo de un tiempo, cuando se hubo acercado un trozo hacia usted, la vio en la dirección b. Usted vio pues que la bola se desplazaba lateralmente en el cielo.

—Estoy de acuerdo —replicó el señor Meyer— ¿Pero no se da cuenta de que para mí debe moverse con mucha mayor lentitud que la bola L, que se desplaza transversalmente a mi visual?

—Sí —contestó Mr. Tompkins— pero con ello se olvida usted de la propagación de la luz, que en nuestra ciudad es muy lenta. Al principio la bola estaba en A. luego en B. Supongamos que la bola necesite dos segundos para pasar de A a B. Pero la luz de A necesita casi dos segundos más para llegar a nosotros que la de B. Por lo tanto, las señales «la bola está en A» y «la bola está en B» le llegan casi simultáneamente. La señal emitida más tarde ha de recorrer una distancia menor. A usted le parece que la bola ha volado en un tiempo muy corto de A a B. Del mismo modo le parece más corto el tiempo que necesita el punto luminoso observado en el cielo para pasar de la visual a a la visual b. Tiene pues la sensación de que la velocidad de la bola es mayor. Cuanto más se acerque la velocidad real de la bola a la velocidad de la luz, más rápido le parecerá que atraviesa transversalmente el cielo la bola que va en su dirección. Si las bolas se alejan del centro de la explosión con una velocidad cercana a la de la luz, le parecerá que la bola K vuela a una velocidad por ejemplo diez veces superior a la

de la bola L, que ya se mueve casi con la velocidad de la luz. Pero en realidad ambas bolas se mueven con la misma velocidad. Todo ha sido producto de una ilusión, apreciado señor.

De pronto el señor Meyer estaba de nuevo en su bicicleta; pedaleó y dio la vuelta a la próxima esquina. Mientras tanto una bola tras otra de los fuegos artificiales estallaba en el cielo dando docenas de puntos luminosos. El señor Meyer veía continuamente bolas azules que brillaban más que las amarillas y que se separaban de las demás en el cielo con velocidades muy superiores a las de la luz. Ahora sé que son las que se dirigen hacia mí, pensó el señor Meyer agachando involuntariamente la cabeza.

El contraejemplo

¿Son una simple ilusión las velocidades superiores a la luz con que parecen alejarse esferas brillantes de los centros de radiogalaxias y quasares, porque en realidad estos objetos apuntan muy aproximadamente hacia nosotros? No es de extrañar entonces que observemos de modo especial las nubes que vuelan hacia nosotros. Su luz, al acercarse a nosotros, es más azul debido al efecto Doppler. El efecto de enrarecimiento, que ahora se ha convertido en un efecto de condensación, pues las esferas brillantes vienen hacia nosotros, hace que estas esferas de gas nos parezcan más brillantes que las esferas de igual luminosidad que van en otras direcciones. También hemos tenido en cuenta este hecho en el sueño del señor Meyer. Las bolas luminosas que parecían volar a mayor velocidad eran las más brillantes, y su color era azul.

Cuando una radiogalaxia expulsa dos nubes de gas que emiten ondas de radio, y una de ellas se mueve hacia nosotros y la otra se aleja de nosotros, la que se acerca ha de parecemos que emite más intensamente, por los motivos antes indicados, mientras que la otra aparecerá debilitada por los efectos Doppler y de enrarecimiento. Por lo tanto, si vemos a ambos lados de una radiofuente dos esferas de radio cuya radiación es apro-

ximadamente igual, sabremos que allí se han emitido en direcciones opuestas dos nubes y que ambas se desplazan transversalmente a nuestra visual. Sabemos que las radiogalaxias tienen mucha memoria, por lo tanto debemos creer que todo lo que sale de la fuente central ha sido proyectado transversalmente a nuestra visual. En tal caso no se mueve nada hacia nosotros y no podemos observar en este objeto velocidades aparentes superiores a la de la luz. Por desgracia hay un contraejemplo al respecto. La fuente 3C179 tiene dos esferas de radio expulsadas hace claramente mucho tiempo, que emiten con igual intensidad. Al parecer, por tanto, en este caso miramos perpendicularmente a las dos direcciones de lanzamiento. Sin embargo, en las proximidades de la fuente central hay pequeñas esferas de gas que parecen desplazarse con una velocidad ocho veces superior a la de la luz.

La única explicación parece ser que esta fuente, al contrario de la mayoría, es «desmemoriada», y que el mecanismo de expulsión efectúa un movimiento de tambaleo. En otra época, cuando fueron expulsadas ambas esferas de radio, el mecanismo disparaba transversalmente a nuestra visual. Luego dio la vuelta y apuntó exactamente hacia nosotros cuando expulsó las nubes de gas que vemos ahora moverse con velocidad superrápida.

Es posible que no se haya dicho todavía la última palabra para esclarecer las velocidades observadas superiores a la de la luz.

¿Están los quasares en el centro de galaxias?

Los núcleos de galaxias activas, de las cuales se expulsa materia, y los núcleos de las galaxias Seyfert parece que tienen mucho en común con los quasares. Las galaxias Seyfert también presentan en sus espectros líneas de absorción causadas evidentemente por nubes expulsadas de gas, aunque las velocidades con que se mueve la materia son en su caso muy inferiores a las de muchos quasares. Los núcleos de las galaxias

Seyfert cambian de luminosidad de modo parecido a los rápidos cambios luminosos de los quasares. ¿Qué tienen en común los quasares y los núcleos de las galaxias? ¿Son los mismos quasares núcleos de galaxias? ¿Explica esto que observemos en los quasares materia estelar al parecer completamente normal, que no presenta nada de especial en su composición química? Las galaxias normales contienen estrellas normales y éstas producen los elementos químicos en las proporciones habituales. Los astrónomos Susan Wyckoff, Peter Wehinger, Hyron Spinrad y Alee Boksenberg observaron en el año 1980 el quasar 3C206 desde el Observatorio Europeo Austral (ESO) en La Silla. Chile, y desde el observatorio cercano de los Estados Unidos en el Cerro Tololo. El quasar tiene un desplazamiento hacia el rojo que corresponde a una velocidad de fuga de 54.000 km/s. Parece pues que el objeto está a 1.080 Mpc de distancia. ¡Los autores descubrieron que el quasar está en el centro de una galaxia elíptica!

¿Son quizá todos los quasares núcleos de galaxias? Al observar los quasares miramos muy lejos en el pasado, miramos la juventud de nuestro Universo. Podría ser pues que las galaxias en su fase juvenil tuvieran núcleos de quasar muy brillantes, que luego se harían poco visibles. Quizá la fase de quasar constituye la niñez de una galaxia. De todos modos, todavía hoy no sabemos cómo nacieron las galaxias, y mucho menos sabemos por qué formaron al principio un núcleo condensado de sólo un mes luz de diámetro.

El quasar doble

En el año 1979 se descubrieron dos quasares separados uno de otro solamente por seis segundos de arco. Ambos presentan exactamente el mismo desplazamiento hacia el rojo y también las mismas líneas en sus espectros. Esto revivió una antigua idea relacionada con la propagación de la luz según la teoría general de la relatividad. Ya hemos explicado que los campos gravitatorios pueden desviar la luz. ¿Qué vemos cuando delante de un quasar hay una galaxia cuya gravedad desvía la luz

del quasar que pasa rozando con ella en su trayectoria hacia nosotros? La galaxia actuará como una lente a través de la cual nosotros observaremos el quasar. Podría ser entonces que la «lente» nos enviara dos haces luminosos por dos trayectorias de longitud distinta. La luz procedente del quasar se ha dividido. Vemos dos imágenes de un mismo quasar.

¿Qué vemos en el quasar doble? ¿Se trata de dos quasares o de un quasar y su imagen fantasma? La decisión no se hará esperar mucho. Si la luz de las dos imágenes de quasar procede del mismo objeto, esta luz ha de haber estado en camino un tiempo distinto en cada uno de los haces luminosos. Hace poco una imagen de quasar ha mostrado un cambio notable de luminosidad, por lo tanto la otra imagen, que tiene un trayecto luminoso de mayor longitud, debe mostrar en el futuro la misma variación. Sería de mucho interés determinar la diferencia en la duración de estos dos trayectos, pues de ahí se podría deducir directamente la diferencia entre sus respectivas longitudes. De ser así, por fin sería posible medir correctamente una longitud en el espacio exterior. Igualmente se conseguiría alguna información sobre la distancia a los quasares y se tendría un método completamente nuevo para calibrar la constante de Hubble.

La segunda imagen de quasar ha variado, efectivamente, en los últimos años de forma semejante a la primera. La variación parece llegar a nosotros 1,6 años después de la primera. ¿Quiere esto decir que la desviación del segundo trayecto respecto del primero es de 1,6 años-luz? El astrónomo noruego que trabaja en Hamburgo Sjur Refsdal ha estimado que, de confirmarse esta diferencia en la duración de los dos trayectos, el valor de la constante de Hubble sería 75. De ser así, habría que multiplicar por 1,5 todas las distancias indicadas en este libro a objetos más lejanos que la galaxia de Andrómeda.

Se han encontrado también en otros sitios del cielo quasares múltiples. ¿Se dispone pues de otros objetos que nos puedan ayudar a determinar el tamaño del Universo?

Desde aquel congreso del año 1963 en Texas en el que se presentaron por primera vez los quasares a un público amplio, se celebran regularmente cada dos años congresos de «Astrofísica relativista». En recuerdo de aquel primer congreso todos

llevan el nombre de «Simposio de Texas», aunque tengan lugar en otro país. El noveno «Simposio de Texas» se celebró en Munich en 1978. La historia de los quasares empezó en el año 1963; 15 años después el programa contenía temas cuya existencia no se hubiera sospechado en aquel entonces. El siguiente capítulo está dedicado a uno de los temas inéditos en 1963.

XII. ...Y LA LUZ SE HIZO

> Si pierdo una moneda de diez centavos y alguien encuentra una moneda idéntica, no podré demostrar que ésta sea la mía. Pero yo he perdido una moneda allí en donde alguien ha encontrado otra.
>
> GEORGE GAMOW (1904-1968)

Los unos la predijeron, los otros la buscaron, los terceros no sabían nada de los anteriores y la encontraron.

Así puede resumirse la historia de uno de los mayores descubrimientos cosmológicos. Se trata de una radiación procedente del Universo que ha enriquecido nuestra comprensión del devenir cósmico más que cualquier otro descubrimiento desde la expansión de las nebulosas espirales.

La cosa empezó de nuevo en el centro de investigación de los laboratorios Bell en Holmdel, Nueva Jersey. Allí, donde 30 años antes Jansky había instalado su antena de carrusel, apareció a fines de los años cincuenta una nueva antena con la que se captaban las señales de radio reflejadas por los satélites de la serie *Echo*. Cuando la antena dejó de utilizarse para las mediciones con satélites se transformó en un radiotelescopio. Uno de los especialistas en antenas de Jansky participó todavía de modo esencial en la planificación del nuevo telescopio, que debía explorar el cielo buscando radiación en una longitud de onda de siete centímetros. Al principio parecía como si el nuevo radiotelescopio se comportara caprichosamente.

El cuaderno de julio del año 1965 del *Astrophysical Journal*, de 400 páginas de grueso, contenía al final una carta al editor de media página cuyo título no hizo saltar a nadie de su silla. «Medición de un aumento de la temperatura de antena en los 4.080 megaherzios», rezaba la noticia que habían enviado para su publicación los autores Arno Penzias y Robert W. Wilson el día 13 de mayo de aquel año. Ambos físicos trabajan

para la Bell Telephone Company y la antena aparentemente recalentada estaba en Holmdel. Lo que se ocultaba debajo de esta breve noticia ha cambiado de modo determinante nuestras ideas sobre el Universo. Más tarde Penzias y Wilson recibieron por este descubrimiento el premio Nobel de física.

¿Qué habían medido? De hecho querían investigar la radiación de la Vía Láctea, que había descubierto Jansky 30 años antes en el mismo lugar. Pero en el intervalo transcurrido se había progresado y se podía captar no sólo radiación del centro de la Vía Láctea sino de regiones alejadas de aquella banda celeste. Esta otra radiación es desde luego mucho más débil, y precisamente allí querían explorar Penzias y Wilson la radiación de radio de la Vía Láctea en longitudes de onda cortas.

Para hacer comprensibles la medición y el notable título del comunicado de Penzias y Wilson debo hablar ahora sobre una costumbre peculiar de los radioastrónomos. A menudo los radioastrónomos expresan en forma de temperaturas la intensidad de la radiación que captan.

El hombre, emisor de radio

Todos los cuerpos que poseen una determinada temperatura superior al cero absoluto de –273°C emiten radiación electromagnética. También nuestro cuerpo humano es un emisor. No sólo emite radiación infrarroja, sino que «brilla» en todo el dominio del espectro electromagnético (ver el capítulo 2).

Imaginemos una persona en una habitación oscura y estudiémosla con un aparato receptor de ondas electromagnéticas cuya longitud de onda podamos variar a voluntad. Si ponemos en marcha el aparato para que capte luz azul, apenas recibiremos nada de la persona. Pero si nuestro aparato es lo suficiente sensible debería llegar a él de vez en cuando una partícula de luz azul. Sintonicemos ahora nuestro receptor con las ondas largas, es decir con el rojo, y recibiremos más señales. Si pasamos a longitudes de onda mayores captaremos todavía más cuantos de radiación. El brillo máximo de nuestra persona en la cámara oscura tendrá una longitud de onda de una centésima

de milímetro, veinte veces superior a la de la luz visible. Si sintonizamos el aparato con ondas todavía más largas, la luminosidad de nuestro emisor humano volverá a disminuir. A pesar de ello continuará radiando en longitudes de onda centimétricas y decimétricas, incluso en el dominio de las ondas de radio. Esto se debe a que emitimos radiación térmica. En la figura 2-9 vimos el espectro de la emisión térmica de cuerpos muy calientes. Al igual que esta radiación, la radiación térmica de un cuerpo de sólo 37°C es reducida tanto en el dominio de las ondas muy cortas como muy largas. Su máximo está entre estos dos extremos. Si el máximo de radiación de un cuerpo de 1.500°K está en dos milésimas de milímetro, el de un cuerpo a la temperatura humana tiene una longitud de onda quintuple.

Si se reduce la temperatura de un cuerpo se tienen dos efectos. En primer lugar aumenta la longitud de onda media de su radiación y en segundo lugar emite menos en todas las longitudes de onda. La figura 2-9 muestra ambos efectos. La curva de radiación a temperaturas bajas está en todas las longitudes de onda por debajo de la curva correspondiente a una temperatura superior. Además su máximo está desplazado hacia las longitudes de onda mayores.

Todos nosotros somos emisores de radiación muy débiles, debido a nuestra baja temperatura, pero con aparatos receptores sensibles podría percibirse la radiación de nuestra persona de prueba. Esto no se debe a que seamos seres humanos, sino a que poseemos una temperatura de unos 37°C. Las personas emiten como todos los demás cuerpos. La piedra, el metal o el suelo de la Tierra emitirían del mismo modo a esta temperatura en todas las longitudes de onda. Los cuerpos calentados no emiten programas de radio demasiado interesantes. Si se hace sonora la emisión se oirá un ruido uniforme, algo realmente aburrido. También las radiofuentes emiten ruido. Los radioastrónomos han aprovechado el ruido de los cuerpos calentados para medir la intensidad del ruido de sus fuentes. Dicen por ejemplo que un lugar del cielo hace ruido en una longitud de onda determinada con una temperatura de digamos 1.000°K, si de aquel lugar y en esta longitud de onda se recibe un ruido tan intenso como el de un cuerpo de prueba a esta temperatura que

emite radiación térmica. Dicen pues que su fuente en la longitud de onda utilizada tiene una temperatura de ruido de 1.000°K. Las temperaturas que atribuyen los radioastrónomos a una radiofuente no constituyen indicación alguna de la temperatura real del cuerpo, sino sólo una medición de la intensidad con que el cuerpo emite en la longitud de onda utilizada. Puede parecer arbitrario a un no especialista que los radioastrónomos midan la intensidad de sus radiofuentes precisamente con una temperatura, pero el sistema ha acabado imponiéndose. También tiene una ventaja. Supongamos que la radiación procede de un cuerpo calentado, por ejemplo de la superficie de un planeta calentado por el Sol a 200°C, es decir, a 473°K. Entonces se capta en todas las longitudes de onda la radiación térmica de un cuerpo de 473°K. Es decir, la superficie del planeta tiene para todas las longitudes de onda la misma temperatura de ruido.

Las radiofuentes cuya radiación tienen un origen distinto del calor propio, por ejemplo la radiación sincrotrón, presentan en distintas longitudes de ondas distintas temperaturas de ruido. Así, por ejemplo, el telescopio de 100 m del Instituto Max Planck de Radioastronomía en Bonn mide en el centro de la Vía Láctea en una longitud de onda de recepción de 73 cm una temperatura de radiación de 2.000°K. Pero en longitudes de onda inferiores la temperatura de ruido es bastante inferior. La emisión radio del centro de la Vía Láctea no se debe al calor propio de las masas de gas que allí se encuentran. Su radiación térmica es demasiado débil. Las temperaturas de ruido medidas no tienen nada que ver con la temperatura real que domina allí.

Pero el ruido que mide el receptor de un radiotelescopio no procede únicamente del Universo. Del mismo modo que todo receptor de radio hace un ruido por su altavoz debido a todo el aparato, desde la antena hasta el amplificador y el altavoz, también todas las partes de un radiotelescopio hacen ruido. El telescopio está evidentemente a una temperatura superior a –273°C. Si quieren observarse radiofuentes débiles, hay el peligro de que su radiación se ahogue dentro del ruido del receptor. Es pues importante mantener lo más bajo posible el ruido del receptor y determinarlo con precisión para saber cuánto ruido

viene de la fuente y cuánto del receptor. Los radioastrónomos comparan también las interferencias de la estación receptora con el ruido de un cuerpo caliente, y le asignan la temperatura de un cuerpo que emite ruido de igual intensidad debido a su propio calor.

A la búsqueda de radiación débil de la Vía Láctea

Volvamos ahora a Holmdel, donde Penzias y Wilson querían poner a prueba su telescopio en regiones exteriores a la Vía Láctea y con longitudes de onda muy cortas, de 7,35 cm. La Vía Láctea todavía emite allí, aunque muy poco, y por lo tanto era preciso asegurarse de que podía reconocerse la radiación buscada a pesar de todas las interferencias. Estas interferencias están constituidas principalmente por la radiación térmica del suelo terrestre, que puede introducirse en la antena. Se utilizó para evitarla una forma especial de la antena. La antena parecía una gigantesca trompetilla que al dirigirse al cielo no pudiera escuchar el suelo de la Tierra.

Como es lógico, también emiten los gases de la atmósfera a través de la cual debía observarse el cielo. Afortunadamente esta componente puede identificarse fácilmente. Si en el transcurso de una noche se sigue un lugar fijo del cielo estrellado, lugar que saldrá y se pondrá con las estrellas, la antena en horas distintas mirará a través de capas de aire de distinto espesor. La parte de la radiación captada debida a la atmósfera se reconoce porque varía en el transcurso de una observación de varias horas, y por lo tanto puede restarse. Pero hay que observar evidentemente con ayuda de una antena y también ella genera ruido de fondo. Quien quiera medir radiaciones débiles del cielo ha de restar también el ruido de la antena. ¿Pero cómo se distingue la radiación que procede del cielo y la que procede de la antena? Generalmente el ruido de una antena puede calcularse de antemano. Una vez conocido puede determinarse en cada medición en cuánto supera la intensidad del ruido medido la intensidad del ruido de antena. El sobrante debe llegar del

cielo. Finalmente también hace ruido todo el aparato amplificador utilizado para aumentar la potencia de la débil señal y alimentar con ella el aparato de registro. ¡Así de difícil es la vida de un radioastrónomo! Este ruido del receptor también debe determinarse por adelantado mediante antenas auxiliares, para poder restarlo. Si se dispusiera de una antena libre de ruidos y pudiera dirigirse a un cuerpo que no emite, todos los ruidos deberían atribuirse al aparato receptor y así podría determinarse el ruido del receptor. Pero no existe ninguna antena sin ruido y ningún cuerpo que no emita, pero es posible aproximarse a estas antenas sin ruido. Y si un cuerpo está a temperatura suficientemente baja, emitirá, pero muy poco, apenas nada.

Lo más frío que puede fabricarse sin mucho esfuerzo es helio líquido. Su temperatura se acerca ya a la temperatura más baja posible, la del cero absoluto a –273°C. La temperatura del helio líquido es de unos 4°K. Si se sumerge dentro de él la antena auxiliar antes indicada de un radiotelescopio, el ruido se reduce considerablemente, queda al nivel del ruido de un cuerpo de 4°K. Una bola de helado quema, comparada con un cuerpo de esta temperatura, pues el ruido que emite con sus 273 grados es 22 millones de veces superior. Penzias y Wilson pudieron conectar su amplificador primero a la antena real y luego a su antena de helio a baja temperatura y de este modo determinar la intensidad de todas las fuentes imaginables de ruido.

Cuando dirigieron su antena al cénit descubrieron una temperatura de ruido de 6,7°K, después de restar el ruido del receptor determinado previamente mediante una comparación con el helio. Intentos a distintas alturas sobre el horizonte permitieron determinar que la atmósfera terrestre contribuía con un ruido correspondiente a una temperatura de 2,3°K. Quedaban por explicar 4,4°K. Se calculó que la antena podía contribuir a este valor con sólo 0,9°K. Quedaba pues un resto de 3,5°K. La señal de ruido que llegaba de la antena era 3,5°K superior a lo debido. Éste fue el resultado que obtuvieron los dos físicos en Holmdel.

Si el ruido no venía del amplificador, ni de la antena, ni de la atmósfera terrestre, ¿procedía quizás del Universo? En caso afirmativo, ¿de dónde? Pronto se vio que el ruido era independiente de la dirección hacia la cual apuntaba la trompetilla de radio. Parecía que todo el cielo estuviera incandescente en todas direcciones, suponiendo que pueda utilizarse esta palabra para la radiación que parte de un cuerpo a –270°C.

Penzias y Wilson en el breve trabajo antes citado informaban únicamente sobre el ruido extra medido. No dieron ninguna explicación sobre él. A no mucha distancia de Holmdel, en Princeton, situado también en el estado de Nueva Jersey, desde hacía un tiempo se estaba buscando febrilmente esta radiación. Un grupo dirigido por el físico Robert H. Dicke estaba buscando los restos de la radiación generada por el calor de la gran explosión primigenia.

La radiación residual de la gran explosión primigenia

Los inicios de la idea se remontan a los primeros años de la posguerra y se deben a un gran físico que ya había dado que hablar en los años veinte, George Gamow. Max Delbrück, un físico que luego se pasó a la biología y que recibió el premio Nobel en 1969, se acuerda del año 1928, cuando Gamow hizo su aparición en Gotinga: «Uno podía sentarse en el primer piso del café “Cron und Lanz”, en el corazón de la ciudad, y ver pasar la vida desde una ventana. Alguien me hizo notar un fenómeno digno de mención: un estudiante ruso recién llegado de Leningrado. Esto era algo nuevo, pues desde la revolución raramente se veían científicos rusos en Alemania y menos un estudiante. Éste había escrito ya un interesante trabajo científico sobre la desintegración alfa del átomo. Tenía un aspecto llamativo: era muy alto y delgado, y lo parecía más por su porte erguido. Era rubio, tenía una gran cabeza y una voz muy aguda.»

En aquel entonces Gamow, que tenía veinticuatro años, había puesto ya los fundamentos de nuestra comprensión de las fuentes de energía que alimentan las estrellas. Además de sus

muchas contribuciones importantes a los dominios más variados de la física, fue el primero en plantearse las consecuencias físicas que tendría el hecho de que el Universo exista desde hace un tiempo finito y de que naciera de un estado de alta densidad, como indicaba la expansión del Universo descubierta por Hubble.

Sus amigos le describen como un hombre de irrefrenable energía, lleno de humor, que en cualquier ocasión extraía de su enorme anecdotario historias imposibles de imprimir. En el prólogo de esta obra he recordado ya que Gamow en uno de sus múltiples intentos para hacer accesible la física a un público amplio inventó también a Mr. Tompkins.

Gamow había pensado a partir de 1946 con algunos de sus colaboradores en la posibilidad de que en la gran explosión primigenia, cuando la materia tenía todavía mucha densidad, dominaran elevadas temperaturas, como las que hay ahora en el interior de las estrellas. En tal caso debieron producirse reacciones nucleares entre los átomos de aquel gas caliente. Gamow confiaba en demostrar que todos los elementos químicos se crearon en la gran explosión a partir del hidrógeno.

Pero Ralph Alpher y Robert Herman, colaboradores de Gamow, dedujeron en 1949 que si poco después de la gran explosión primigenia dominaron temperaturas de millones de grados debían existir todavía restos en el Universo de la radiación presente en aquel momento. Aquella radiación debió de enfriarse hace mucho tiempo, a consecuencia de la expansión sufrida por el Universo desde entonces. La radiación enrarecida y con longitud de onda larga tenía que desempeñar ahora un papel subordinado en el devenir cósmico. Gamow no dio a esta radiación residual ninguna importancia esencial.

Dicke reemprendió en 1964 estas consideraciones, pero sin conocer las anteriores reflexiones de Gamow. Uno de sus colaboradores era P. James E. Peebles. Dicke aconsejó a dos colaboradores más, Peter G. Roll y David T. Wilkinson, que buscaran la radiación. El aparato que utilizaron para ello no era muy grande, y pudo montarse sobre el tejado del laboratorio Palmer de Princeton. Pero antes de que pudieran valorar sus

mediciones, les visitó Penzias, que se había enterado de los intentos de medición de los princetonianos. Los princetonianos interpretaron inmediatamente las mediciones de Penzias y de Wilson como la radiación residual de la gran explosión primigenia que ellos buscaban. Así pues, en el mismo cuaderno de la revista, justo delante de la carta del grupo de Bell se imprimió una carta al editor del grupo de Princeton donde los autores indicaban que podían existir todavía restos de la probable radiación caliente de la gran explosión primigenia. La frase clave en su publicación reza así: «Todavía no disponemos de todos los datos medidos, pero queremos subrayar aquí una posible conclusión: las mediciones de Penzias y Wilson indican una radiación térmica de 3,5°K.» Por lo tanto, Dicke, Peebles, Roll y Wilkinson interpretaban el ruido suplementario medido en Holmdel como radiación térmica de origen cósmico, que incide sobre nosotros desde todas direcciones con igual intensidad. No se hablaba para nada de Gamow, ni tampoco de Alpher ni de Herman.

El cuarto «Simposio de Texas» sobre astrofísica relativista se celebró de nuevo en Dallas, como el primero. Hubo una sesión especial sobre la radiación de fondo cósmica. Se había encomendado la dirección a George Gamow. Gamow pronunció entonces las palabras que he reproducido al principio del capítulo. El aplauso fue largo y tendido.

Los amigos, colaboradores y colegas de Gamow preparaban una miscelánea a publicar en ocasión de su 65 aniversario. Pero Gamow murió antes y la obra se convirtió en un simple volumen a su memoria. Lo tengo en las manos y lo hojeo. Penzias describe en él cómo llegó a descubrir la radiación de fondo. Finaliza así su contribución: «La imagen que han conseguido los radioastrónomos del Universo, por incompleta que sea en sus detalles, se ajusta de modo excelente a lo que había dibujado George Gamow en 1949, un cuarto de siglo antes.» Alpher y Herman dedicaban recuerdos personales a su gran maestro. Ambos habían abandonado desde hacía tiempo la investigación pura, por desengaños personales. Uno trabajaba en General Electric, el otro en General Motors.

La radiación fría que llega del calor

El grupo de Princeton afirmaba que Penzias y Wilson habían descubierto la radiación térmica de la gran explosión primigenia, una radiación enrarecida, enfriada y con una gran longitud de onda. Se disponía entonces de una única medición en una sola longitud de onda, los 7,35 cm. Para comprobar que se trataba realmente de radiación térmica había que demostrar que la intensidad de la radiación variaba con la longitud de onda como variaría la de un cuerpo de 3,5°K. Era preciso por lo tanto investigar todo el espectro. Actualmente conocemos muchos dominios de él, y estamos observando realmente la radiación de un cuerpo con una temperatura de unos 3°K (fig. 12-1), o quizás más bien de 2,7°K. En lo que sigue nos quedaremos, para simplificar, en los 3°K.

Este descubrimiento es una fuerte confirmación de la hipótesis de la gran explosión primigenia. Puede suponerse que en un Universo estacionario con materia que aparece uniformemente y espontáneamente en el espacio también aparecerá radiación de la nada, pero sería difícil de entender que esta radiación fuera precisamente térmica. Con la gran explosión primigenia todo es distinto. Es lógico en su caso que al principio la materia y la radiación estuvieran unidas y tuvieran la misma temperatura elevada. Cuando más tarde la materia y la radiación se enrarecieron por la expansión del Universo, la radiación se enfrió. Hoy corresponde únicamente a la de un cuerpo de 3°K. Al descubrirse la *radiación de fondo cósmica* (éste es el nombre que se da a la radiación descubierta por Penzias y Wilson) predicha por la teoría de la gran explosión primigenia, parece que la teoría del Universo estacionario quedó ya abolida por bella que fuera su uniformidad del espacio y del tiempo.

Sin embargo, la radiación recién descubierta nos plantea nuevos problemas. Llega muy uniformemente de todas direcciones. Esto nos sorprende, porque procede de una época en la que el Universo debió de ser ya muy granuloso. Al fin y al cabo se supone que las galaxias y los cúmulos galácticos se formaron a partir de oscilaciones de densidad de la materia. Sin embargo, la radiación no presenta ninguna irregularidad, ninguna

estructura granulosa en el cielo. Parece como si la radiación de la gran explosión y con ella probablemente la materia, con la cual estaba unida y a partir de la cual se formaron las galaxias y los cúmulos galácticos, fuera desde siempre uniforme. Pero entonces, ¿cómo se formaron las galaxias?

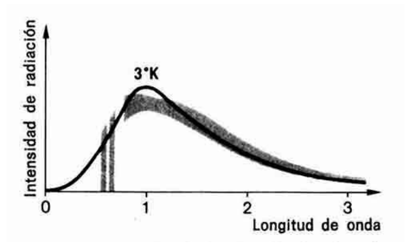


Fig. 12-1. Espectro de la radiación de fondo cósmica. Las longitudes de onda están representadas en milímetros hacia la derecha. La curva continua corresponde a la radiación térmica de un cuerpo de 3°K. Véase también la figura 2-9, pero teniendo en cuenta que allí las longitudes de onda están dadas en milésimas de milímetro. Por lo tanto, las curvas de aquella figura estarían aquí muy a la izquierda, en el lugar donde dibujaríamos la luz visible, muy cerca del cero. Las curvas de la figura 2-9 estarían muy por encima de la dibujada aquí, pues en esta gráfica la intensidad de radiación está representada con mucha exageración. No puede dibujarse ningún punto de medición debido a la gran incertidumbre de las mediciones de la radiación de fondo cósmica. Sólo se sabe que han de estar dentro de las zonas gris en las longitudes de onda correspondientes. El dominio de las ondas de radio medibles desde la superficie terrestre está a la derecha, fuera de la figura. El dominio de las ondas milimétricas representado aquí se mide desde aviones y globos.

El viento cósmico

Cuando el día 9 de abril de 1960 un avión Lockheed americano de tipo U2 fue derribado con su piloto Francis Harry Powers sobre territorio de soberanía soviética, Jruschov boicoteó una conferencia internacional en París. Desde entonces los vuelos de reconocimiento de los aviones norteamericanos U2 se dedican a objetivos bastante más inofensivos. A fines de los años setenta llevaron aparatos de medición a altitudes de 20

km, desde donde, lejos de las interferencias de la atmósfera terrestre, se investigó la radiación de fondo cósmica en longitudes de onda de décimas de milímetro, a fin de comprobar si realmente llega de todas direcciones con la misma intensidad.

Existe una ligera irregularidad. Nos movemos con la Tierra alrededor del Sol y con el Sol alrededor del centro de la Vía Láctea. Si nuestra Tierra está sumergida en un baño de radiaciones que las envuelve uniformemente en todas direcciones, debemos recibir la radiación en nuestra dirección de avance con algo más de intensidad, porque debido al efecto Doppler debería estar desplazada hacia el azul, es decir, poseer más energía. Deberíamos recibir por segundo más cuantos de radiación, puesto que volamos a su encuentro. En cambio, la radiación procedente de la dirección contraria debería estar debilitada, a causa del desplazamiento hacia el rojo y del efecto de enrarecimiento.

Parece realmente que la radiación de fondo es ligeramente más intensa en una determinada dirección. La diferencia no es muy grande, sólo seis partes por mil, pero todavía puede medirse. ¿Significa esto que en la no uniformidad de la radiación de fondo hemos encontrado de nuevo el movimiento de la Tierra alrededor del Sol y del centro de la Vía Láctea? Parece ser que estos movimientos son insuficientes para explicar que la radiación recibida de una dirección del cielo sea más intensa. Parece como si hubiera un movimiento más, un movimiento del cual hasta ahora los astrónomos no tenían idea. La ligera mancha «más caliente» de la radiación de fondo cósmica indica que la Tierra, además de su movimiento alrededor del Sol y del centro galáctico, tiene otro movimiento hacia la constelación de la Hidra con una velocidad de unos 500 km/s.

Como es lógico, no sólo se desplaza la Tierra, sino también el Sol, y éste a su vez se desplaza con todo el sistema galáctico. En el aumento de intensidad de la radiación procedente de la constelación de la Hidra probablemente sólo estamos viendo el viento de marcha correspondiente a este movimiento.

Si prescindimos de esto, la radiación de fondo cósmica no presenta más irregularidades medibles. Es muy isótropa, para utilizar el lenguaje del capítulo 8. Esto es una indicación de que

probablemente el Universo en su conjunto sea también homogéneo.

La mezcla materia-radiación del Universo

Por desgracia, el descubrimiento de la radiación de fondo cósmica da pocas respuestas a nuestras preguntas sobre la constitución del Universo, su geometría y su expansión. Sin embargo, nos permite una visión insospechada de la juventud de nuestro Cosmos, de la época inmediatamente posterior a la gran explosión primigenia.

De hecho nuestro Universo no se enriquece mucho con la pizca de radiación que descubrieron Penzias y Wilson. Esta radiación no desempeña ningún papel especial si se compara con la materia que llena el espacio en forma de átomos. Imaginemos para simplificar la materia del Universo distribuida uniformemente por el espacio; supongamos que las galaxias y en ellas sus estrellas, incluso las más compactas, están disgregadas y sus masas mezcladas de modo uniforme por el espacio intergaláctico. La densidad de la materia universal sería entonces muy pequeña. Si tomamos sólo la materia visible, a ocho metros cúbicos corresponde la masa de un átomo de hidrógeno. (Si incluyéramos la hipótesis materia invisible de la cual hablamos en el capítulo 9, la densidad sería quizá diez veces superior.) Imaginemos ahora en nuestro Universo lleno de materia diluida una esfera con el diámetro del Sol, el cual como es lógico también ha aportado su materia a la distribución uniforme de que estamos hablando. En nuestro volumen solar sólo habrá entonces tras de la distribución de toda la masa 280 gramos de la materia visible del Universo.

La materia no lo es todo. No debemos olvidar la radiación de fondo cósmica. Vamos a utilizar una unidad especial para medir esta radiación. Hemos visto en el capítulo 2 que en realidad la masa y la energía son la misma cosa, y que una puede transformarse en la otra. Por lo tanto, una cantidad de energía

no sólo puede darse en joules[17], sino también en gramos. Este método no es muy adecuado para medir energía en la vida diaria. Pero pronto veremos que en la descripción de la historia de nuestro Universo la unidad gramo aplicada a la energía resulta muy útil. En un gramo hay mucha energía. La energía que proporciona en un año día tras día una central de 300 megavatios, es decir, una central térmica de potencia media, equivale a unos 100 gramos en nuestra nueva unidad de energía. En el Universo diluido donde una esfera de volumen solar no contiene sino 280 gramos de materia, los cuantos de la radiación de fondo cósmica dan tumbos entre los átomos distribuidos. Los cuantos son mucho más numerosos que los átomos. En un metro cúbico se encuentran en cada instante unos 500 millones de cuantos de la radiación de 3°K. Recordemos que hay que buscar en ocho metros cúbicos para encontrar un átomo. Los cuantos de radiación podrían ganar a los átomos por una mayoría de miles de millones de votos si se celebraran elecciones democráticas en el Universo. Sin embargo, hoy en día no tienen mucho que decir, porque casi toda la energía del Universo está contenida como masa en reposo de la materia. Si llenamos la esfera solar con la parte que le corresponde de los cuantos de la radiación de 3°K, la energía de radiación corresponderá únicamente a un gramo de masa. La densidad de la materia en el Universo actual es casi trescientas veces superior a la de la radiación.

Hemos llenado mentalmente la esfera con una muestra de la mezcla materia-radiación del Universo. Pero deberíamos tener en cuenta también que la materia de la esfera participa en el movimiento Universal de expansión de Hubble. Si hoy encaja exactamente en la esfera de radio solar, al cabo de un año la rebasará un poco. En el pasado esta materia estaba comprimida en un espacio más pequeño. Pero nuestra mezcla no es en absoluto exótica. Los átomos, principalmente los del hidrógeno, son átomos muy normales, como los que conocemos en la Tierra. También conocemos la radiación. No se diferencia

---

[17] No es preciso recordar que el joule es una unidad de energía. Antes un exceso de calorías era el causante de nuestro exceso de peso. Desde el 1-1-1978 se ha fijado legalmente en Alemania que debemos culpar a un exceso de joules.

esencialmente de las ondas de radio de longitud muy corta. Conocemos pues muy bien las propiedades de la mezcla cósmica. Esto sugiere la idea de un experimento gigantesco.

La materia cósmica en el banco de pruebas

Supongamos que nuestro tamaño fuera tan grande que pudiéramos experimentar con la materia Universal a gran escala, y que fabricáramos una gran caldera en la que cupiera el volumen del Sol. Llenémosla mentalmente con nuestra mezcla Universal, es decir, con los 280 gramos de materia, y luego con un gramo de radiación térmica a la temperatura de 3°K. La primera fila de la tabla 12-1 nos da los valores numéricos de nuestra caldera llena de volumen solar. Si ahora comprimimos la caldera hacemos exactamente lo inverso de lo que hizo la naturaleza en el pasado. Ella dejó que la mezcla se expandiera, nosotros en cambio la comprimimos otra vez, es decir, la devolvemos a un estado anterior. La compresión nos permite retrotraer la materia al pasado y acercarnos a la gran explosión primigenia.

En el primer intento de compresión ya sorprende que si bien la densidad de la materia y de la radiación aumentan simultáneamente, la densidad de radiación crece con mayor intensidad que la de materia. Esto se debe a que en nuestra esfera la radiación presiona con mucha mayor intensidad contra la pared exterior que la materia. Cuando comprimimos ejercemos un trabajo contra la presión de ambos componentes de la esfera. El trabajo que realizamos contra la presión de la radiación es muy superior al realizado contra la materia. Con nuestro trabajo introducimos energía, por lo tanto la radiación contiene más energía que la materia. Es decir, la radiación se aprovecha bastante más que la materia del trabajo de compresión.

Si al principio la densidad de materia era casi trescientas veces superior, la densidad de radiación al comprimir aumenta notablemente. Si en nuestra caldera de compresión hemos reducido el volumen al correspondiente a la mitad del radio solar,

el gas todavía es ciento cincuenta veces más denso que la radiación. Además, en su interior aumentan las temperaturas. Al comprimir tuvimos que aportar trabajo, y esta energía ha pasado principalmente a la radiación. Su distribución espectral equivale ahora a la de un cuerpo de 6°K. Deducimos pues que en el pasado del Universo, cuando entre la galaxia sólo había la mitad de la distancia actual, la radiación de fondo cósmica tenía una temperatura de 6°K. Remontémonos todavía más hacia el pasado.

Tabla 12-1. Resultado del experimento ideal con la materia del Universo descrito en el texto

Diámetro de la esfera	Masa en forma de protones, neutrones y electrones	Masa en forma de fotones	Temperatura	Tiempo transcurrido desde el big bang	Masa en forma de neutrinos
1.400.000 km	280 g	1 g	3°K	20.000 millones años (hoy)	2.800 g
1.400 km	280 g	1.000 g	3.000°K	300.000 años	3.250 g
4,66 m	280 g	300 Tm	900 millones °K	230 s	136 Tm

Comprimamos la mezcla universal a una milésima parte de su radio original (tabla 12-1, fila 2). Ahora la esfera tiene sólo un diámetro de 1.400 kilómetros. La densidad de materia se ha multiplicado por mil millones en relación a la del principio de nuestro experimento, pero la densidad de radiación ha aumentado todavía más, superando la del gas. Por ello tenemos ahora en la esfera más radiación que materia. La radiación ya no es el socio subordinado. La densidad de radiación es más de tres veces superior a la densidad de materia. La temperatura de la radiación ha subido de los 3°K originales a 3.000°K. Ésta sería la situación de nuestro Universo unos 300.000 años después de la gran explosión primigenia. Este momento no constituye un hito en la historia de nuestro Universo únicamente porque la radiación cedió su preeminencia a la materia, sino que fue decisivo por otro motivo.

Cuando la materia y la radiación se separaron

Durante nuestro experimento mental, mientras comprimíamos continuamente nuestra mezcla cósmica, los cuantos de radiación vivían en un estado muy pacífico. De vez en cuando cada átomo chocaba con un cuanto de radiación, pero casi siempre estos cuantos tenían tan poca energía que no podían perturbar los electrones que giran alrededor de los núcleos atómicos. Pero ahora, con una temperatura de radiación de cerca de 3.000°K, los cuantos de radiación empiezan a arrancar electrones de los átomos de hidrógeno. La materia se *ioniza*, es decir, pasa a un estado en el que los núcleos de hidrógeno y los electrones desprendidos vagan libremente por el espacio. Pero los electrones libres constituyen un obstáculo importante para la radiación. Cada cuanto de radiación es detenido continuamente por un electrón y desviado de su trayectoria, del mismo modo que la luz no puede seguir su camino propio en un líquido turbio, pues cada partícula luminosa es retenida y desviada por las partículas sólidas que flotan en el líquido. Al comprimir hasta una temperatura de 3.000°K la sopa cósmica materia-radiación se vuelve repentinamente opaca. El experimento de regreso al pasado ha seguido este curso, pero en la naturaleza el proceso tuvo lugar exactamente a la inversa.

Al principio la materia era caliente y opaca. Cuando a consecuencia de la expansión correspondiente a la ley de Hubble la temperatura bajó por debajo de los 3.000°K, los electrones se fijaron a los núcleos de hidrógeno, nada impidió ya el movimiento de los cuantos de radiación y el Universo se hizo transparente (fig. 12-2).

He dicho que la materia era una sopa, pero esta sopa estaba ya muy diluida, pues la densidad de materia no alcanzaba ni siquiera la de la actual nebulosa de Orión, una nebulosa gaseosa de la Vía Láctea cuya densidad es muy inferior a la del mejor vacío de nuestros laboratorios.

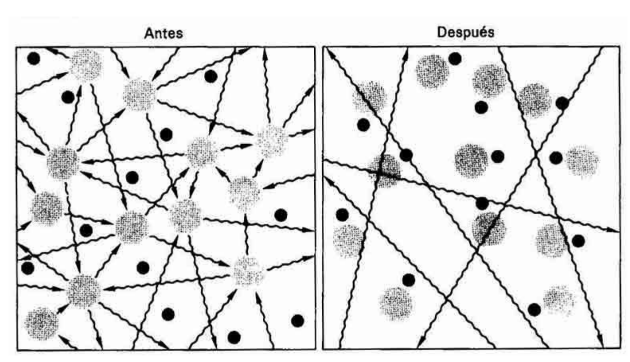


Fig. 12-2. Acontecimiento de grandes consecuencias que tuvo lugar 300.000 años después de la gran explosión primigenia. Antes de él (izquierda) los electrones (discos grises) impedían la propagación de los cuantos de luz (flechas onduladas). Cada cuanto sólo podía desplazarse sin obstáculos un trayecto relativamente corto, hasta que era desviado de nuevo. Después (derecha) los electrones se unieron a los protones (puntos negros) y ya no impidieron la propagación de los cuantos de luz; el Universo se había vuelto transparente.

La radiación toma el poder

Sigamos comprimiendo la mezcla en nuestro experimento, y tratemos de conseguir un estado correspondiente al de nuestro Universo cuando era trescientos millones de veces más pequeño que hoy. Nuestra esfera solar ha quedado comprimida a un diámetro de 4,66 metros (tabla 12-1, fila 3). La radiación ha conseguido más supremacía todavía: en un centímetro cúbico hay ahora casi seis gramos de radiación y en toda la esfera 300 toneladas.

La radiación tiene pues una densidad muy superior a la de una roca. En cambio la materia, con doscientas milésimas de gramo por centímetro cúbico, se convierte en un componente despreciable de la mezcla. Éste es el mensaje que nos comunicaron Penzias y Wilson con su descubrimiento: *En el pasado del Universo lo que determinó su curso no fue la materia sino la radiación electromagnética.*

Los núcleos atómicos tenían en aquella época una temperatura tan alta como la que domina actualmente en las regiones centrales de las estrellas. Sabemos que allí los núcleos atómicos chocan con tanta rapidez unos con otros que llegan a penetrarse mutuamente en su interior y dan lugar a reacciones nucleares. Si en los inicios del Universo sólo había átomos de hidrógeno, en la fase que hemos simulado ahora con nuestro experimento mental pudo formarse helio a partir de hidrógeno. Quizá se formaron otros elementos. Esta idea inspiró a Gamow y a sus colaboradores la predicción de la radiación de fondo cósmica. Pero al principio del Universo no le quedaba mucho tiempo al hidrógeno. Nos hemos acercado a 230 segundos de la gran explosión. Todo iba realmente muy rápido.

Acerquémonos todavía más al principio del Universo. Si el estado que acabamos de describir corresponde al intervalo de 100 a 1.000 segundos después de la creación, nos arriesgaremos un poco y nos acercaremos a sólo un segundo después de la explosión primigenia. La temperatura es de diez mil millones de grados. A esta temperatura tan alta los cuantos de radiación, principalmente radiación gamma, tienen tanta energía, que adquiere importancia un fenómeno que ya conocemos. Un cuanto de radiación puede convertirse en un electrón y en un positrón si tiene energía suficiente y se encuentra en un campo eléctrico, por ejemplo en las cercanías de una partícula con carga eléctrica. Discutimos este fenómeno en el capítulo 2. La radiación se transforma en materia. Esta transformación demuestra lo acertado que es medir la energía en gramos, la unidad de masa. Un gramo de radiación puede convertirse en un gramo de materia. Ahora en nuestro experimento la radiación y los pares electrón- positrón están en continua transformación. Se crean pares a partir de la radiación y estos pares se destruyen luego para formar de nuevo radiación, a partir de la cual se volverán a crear nuevos pares.

¿Dónde se oculta la antimateria?

Retrocedamos todavía un poco más en nuestro experimento y comprimamos algo más la mezcla. La temperatura aumenta y los pares predominan. Ahora en nuestra esfera comprimida hay más gramos en forma de materia que en forma de radiación. En esta mezcla formada por radiación, electrones y positrones hay todavía núcleos de hidrógeno, es decir, protones, y neutrones. Ambos contribuyen poco a la densidad total.

Remontémonos todavía más hacia densidades más altas y temperaturas más altas. Encontramos entonces cuantos de radiación de energía tan alta que pueden crear incluso partículas pesadas, no sólo protones y antiprotones, sino todas las partículas de la física de las partículas elementales y las correspondientes antipartículas.

Los físicos saben pocas cosas hoy en día sobre el estado de la mezcla radiación-partículas imperante en aquel momento. La opinión general era hasta ahora que a partir de la radiación sólo puede crearse materia y antimateria en idénticas proporciones; un par electrón-positrón, un par protón y antiprotón o un par neutrón y antineutrón. Con cada partícula de materia nace una antipartícula. El antiprotón tiene carga eléctrica opuesta a la del protón, o sea, carga negativa. El antineutrón es eléctricamente neutro, como el neutrón. Pero si se unen un neutrón y un antineutrón también se destruyen convirtiéndose en radiación.

En principio también pueden construirse átomos con antimateria. En el antihidrógeno un positrón gira alrededor de un núcleo de carga negativa, que es un antiprotón. En el antihelio el núcleo atómico está formado por dos antiprotones y dos antineutrones. Alrededor de este núcleo de carga negativa giran dos positrones que forman la envoltura atómica.

Podemos así imaginar antielementos correspondientes a todos nuestros elementos químicos y cuerpos de antimateria correspondientes a los cuerpos formados por los elementos normales. De lejos no puede saberse si un objeto está formado de materia o de antimateria. Incluso cuando brilla como una estrella su espectro es el mismo, con independencia de que su luz se

deba a átomos o a antiátomos. Si se reúne la materia y la antimateria, se aniquilan convirtiéndose en radiación[18].

Es una notable propiedad de nuestro Universo el hecho de que al parecer esté formado únicamente de materia. En ocasiones nacen antipartículas, pero su esperanza de vida es corta. Topan muy rápidamente con una partícula, el positrón con un electrón, el antiprotón con un protón, y se aniquilan convirtiéndose en radiación. Pero si la materia nació de la radiación en la gran explosión primigenia, tuvo que crearse un número igual de partículas que de antipartículas.

Sería imaginable que la materia y la antimateria estuvieran presentes en el Universo con igual frecuencia. ¿Quién sabe si el cúmulo galáctico de Virgo está formado por materia o por antimateria? Sólo trayendo materia sabríamos si al tocar la nuestra se convierte o no en radiación. Quizá la materia y la antimateria se separaron después de nacer de la radiación y han formado galaxias y antigalaxias, cada tipo de materia por su cuenta.

De todos modos, nuestro Universo, miremos donde miremos, parece formado únicamente por materia. Hemos visto ya que el espacio intergaláctico no está vacío, y en algún lugar debería la materia y la antimateria aniquilarse de modo continuo y convertirse en radiación. Pero en tal caso debería observarse un número muy superior al medido de cuantos de gran energía de radiación gamma. El Universo parece declaradamente asimétrico, con un predominio de la materia sobre la antimateria. Quizá existía desde el principio por motivos que no entendemos todavía un pequeño exceso de materia sobre antimateria. Al principio la asimetría no era muy grande. La mayor parte de la materia se aniquiló con la antimateria y se convirtió en radiación. El exceso original es la presente materia del Universo.

Se cree últimamente que la simetría del Universo, referida a las partículas y las antipartículas, desapareció muy pronto.

---

[18] Si un joven se enamorara de una chica de un mundo de antimateria habría que recomendarle encarecidamente que limitara su relación a un amor platónico.

Parece que las leyes de la naturaleza permiten que en el dominio de las partículas elementales la antimateria puede transformarse en materia.

Los primeros elementos químicos

La radiación de fondo cósmica nos ha revelado la historia térmica de nuestro Universo. No hemos aprendido nada sobre otros temas: en qué Universo vivimos, en qué geometría, si estamos en un Universo infinito o en un Universo que volverá a contraerse y que volverá a vivir los procesos de la explosión primigenia, pero en una secuencia temporal inversa. Sabemos sin embargo que en los primeros minutos del Universo las temperaturas eran tan altas que los protones podían reaccionar entre sí y quizá fusionarse formando elementos superiores. El hidrógeno del Sol dispone de miles de millones de años, aunque la temperatura es cien veces inferior, pero en la gran explosión primigenia las partículas sólo tuvieron oportunidad de reaccionar durante unos minutos. Lo que no pasó durante este tiempo ya no pasó en las temperaturas inferiores de la era siguiente. Las reacciones nucleares crean deuterio, helio y algunos elementos ligeros más. El deuterio está emparentado con el hidrógeno. El núcleo del hidrógeno es un protón, en cambio el núcleo del deuterio está formado por un protón y un neutrón. En los dos casos un solitario electrón recorre su órbita en la parte exterior del átomo. El deuterio no se distingue químicamente del hidrógeno, sólo su núcleo atómico tiene una masa superior. Por ello el deuterio se llama también «hidrógeno pesado».

Hemos dicho ya que conocemos con muy poca precisión la densidad de materia del Universo, ni siquiera sabemos cuánta masa contiene realmente una galaxia (ver la pág. 233). El hidrógeno pesado del Universo nos ofrece la posibilidad de deducir dando un rodeo la densidad de materia del Universo. Las abundancias relativas de los elementos creados inicialmente dependen de los detalles de la expansión temprana del Universo. Si pudieran determinarse las abundancias de los elementos en la materia primigenia no contaminada todavía por las

reacciones nucleares de las estrellas podríamos saber más cosas sobre los primeros minutos del principio del Universo. También podemos proceder a la inversa y seguir distintas historias evolutivas del Universo creado en la gran explosión primigenia. Las distintas posibilidades corresponden a las tres dibujadas en la figura 8-4. Según sea la densidad que tenía la materia poco después de la explosión primigenia, se tiene en cada caso un retraso distinto. Del mismo modo la expansión y el enfriamiento consiguiente tienen lugar con distinta rapidez. Se puede calcular la densidad y la temperatura de cada uno de estos *modelos de Universo* y su evolución en el tiempo y determinar en cada punto qué cantidad de nuevos elementos se forma a partir de protones y neutrones. Como es lógico, sólo pueden considerarse los modelos en los cuales a la constante de Hubble observada actualmente corresponde la radiación de fondo observada actualmente. Cada uno de estos modelos de Universo proporciona una determinada densidad de materia en el momento actual. Pero también da una determinada proporción de elementos ligeros creados en la explosión primigenia. Si se pudiese determinar mediante la observación las abundancias relativas de estos elementos, podría obtenerse el modelo de explosión primigenia «correcto», y obtener la correspondiente densidad de materia actual. He dicho ya que la observación no proporciona datos exactos sobre la densidad de materia del Universo: si sólo teníamos en cuenta la materia visible había un átomo de hidrógeno en ocho metros cúbicos de espacio. Este valor se ha obtenido contando las galaxias y determinando la masa que contienen. Ahora puede obtenerse la densidad de materia indirectamente separando el modelo de explosión primigenia que proporciona las abundancias correctas de los elementos. Con la constante de Hubble observada, la densidad de masa obtenida mediante las abundancias de los elementos nos dice cuál es la geometría del Universo en el cual vivimos.

Se obtiene para la densidad de materia del Universo un átomo de hidrógeno en 2,8 metros cúbicos. Este valor es superior al que hemos supuesto hasta ahora. Sin embargo, de la teoría de Einstein se deduce que muy probablemente vivimos en un Universo abierto. Tanto si se tiene en cuenta la repulsión

gravitatoria (ver la pág. 213) como si no, nunca volverá a contraerse. Como máximo podría comprimirlo de nuevo una atracción cosmológica.

De todos modos, esta conclusión no es tan segura como la describo. Se basa esencialmente en la abundancia observada del elemento deuterio. No sabemos con certeza si en la historia posterior e inofensiva del Universo, cuando ya todo estaba tranquilo, la abundancia del deuterio no acabó por ser falseada. En estrellas muy normales puede crearse hidrógeno pesado y también aniquilarse.

Un resultado importante de estas investigaciones de varios universos de prueba debidos a David Schramm de la Universidad de Chicago, y a Robert Wagoner, de la Universidad de Stanford en California, es la abundancia de helio creado en los primeros minutos de nuestro Universo. Los Cálculos de computador de ambos autores demuestran que se convirtió en helio del 20 al 30 por ciento en peso de la materia. Esto concuerda muy bien con lo que nos revelan los espectros de estrellas muy viejas sobre la composición química de sus atmósferas. Este resultado es un argumento fuerte en favor de la hipótesis de la gran explosión primigenia.

Veremos inmediatamente que a pesar del resultado del deuterio, que parece favorecer un Universo abierto, el Universo posiblemente sea cerrado. La clave no está de momento en manos de los astrónomos sino de los físicos especialistas en partículas elementales.

¿Cierran los neutrinos el Universo?

Nuestro experimento mental con la mezcla comprimida del Universo nos ha permitido vivir en sentido inverso la historia cósmica. Hemos visto que poco después de la explosión primigenia prácticamente todo era radiación, en la que al aumentar la expansión y el enfriamiento fueron creándose cada vez más partículas materiales. Pero hemos olvidado una componente del Universo actual, los *neutrinos.* La existencia de esta partícula elemental se sospechaba desde 1930. Aquel año Wolfgang

Pauli, uno de los pioneros de la mecánica cuántica, descubrió que la desintegración radiactiva de algunos átomos sólo podía explicarse mediante la existencia de una determinada partícula elemental, el neutrino. Esta partícula debía parecerse más a las partículas de la luz que por ejemplo a los electrones o los protones. Se creía que el neutrino (y también naturalmente el antineutrino) posee una masa en reposo nula. Al parecer se desplaza a la velocidad de la luz y casi nunca entra en interacción con la materia. Casi nunca un átomo capta un neutrino, y casi nunca experimentan los núcleos atómicos cambios que permitan demostrar la acción de los neutrinos y por lo tanto su existencia. Los neutrinos atraviesan el globo terrestre como si nada. Se necesitaría una masa de plomo de varios años luz de espesor para ofrecerles resistencia. Sin embargo, en los años cincuenta se descubrió la partícula predicha por Pauli en 1930. Hoy sabemos que existen varias clases de esta liviana partícula, con sus correspondientes antipartículas.

En la época primitiva de nuestro Universo, cuando la radiación todavía lo dominaba, los cuantos de radiación de gran energía no sólo crearon pares electrón-positrón, sino también neutrinos y antineutrinos. Estos neutrinos, indiferentes prácticamente al resto del Universo, deberían existir todavía hoy. Se calcula que actualmente hay en un centímetro cúbico varios centenares de neutrinos procedentes de aquella época inicial del Universo, que se han enfriado hasta la inanidad por la expansión del Universo, como los cuantos de la radiación de fondo cósmica. Por lo tanto, no pueden influir de modo esencial en nuestras ideas sobre la estructura del Universo. Esto se pensaba hasta hace poco.

Pero los especialistas en partículas elementales han empezado a dudar en los últimos tiempos que los neutrinos se parezcan tanto a los cuantos de luz. Se considera muy imaginable que un neutrino posea masa en reposo. Esto no tuvo mucha importancia en los inicios del Universo, cuando los neutrinos tenían tanta energía que su masa estaba determinada esencialmente por su energía cinética y no por su masa en reposo. Al enfriarse el Universo la energía disminuyó, pero la masa en reposo se mantuvo.

Supongamos que en cada neutrino que se mueve por el espacio desde los primeros tiempos se ocultan cincuenta milésimas partes de la masa de un electrón en forma de masa en reposo (ver la tabla 12-1, última columna). Entonces en nuestra esfera solar llena de materia cósmica habría actualmente (fila 1) diez veces más masa en forma de neutrinos y de antineutrinos que en forma de materia «normal». Viviríamos en un mundo formado principalmente por neutrinos. La materia visible sería únicamente un pequeño suplemento de la masa del Universo. Recordemos lo siguiente: la densidad de materia del Universo decide de modo definitivo si el Universo es abierto o cerrado. Hasta ahora parecía que la materia no tuviera densidad suficiente para que el Universo fuera cerrado. Los neutrinos pesados nos acercan más a la densidad crítica.

Hemos supuesto en este razonamiento que en cada neutrino hay cincuenta milésimas partes de la masa de un electrón. Los físicos especialistas en partículas elementales tienen de momento ideas muy imprecisas sobre la masa de reposo que quieren conceder a los neutrinos. También podría ser que en un neutrino hubiera cinco milésimas de la masa de un electrón, es decir, diez veces más de lo que acabamos de suponer. En tal caso la densidad del Universo actual sería tan grande que viviríamos en un espacio de curvatura positiva constante, correspondiente al Universo esférico de los hombres planos.

¿Es pues nuestro Universo abierto o cerrado? ¿Es la suma de los ángulos de un gran triángulo inferior o superior a 180 grados? ¿Continuará nuestro Universo expandiéndose indefinidamente o experimentará su movimiento de fuga un frenado tan intenso que al final todo finalizará en una implosión definitiva? Hoy por hoy parece que es a los especialistas en partículas elementales a quienes toca dar la respuesta.

Si la masa en reposo de los neutrinos no es nula, quizá la mayor parte de la masa del Universo se oculta en neutrinos invisibles. ¿Es éste el motivo de que las galaxias parezca que tengan más masa de la que vemos (página 233)? Quizá cada galaxia sea principalmente un enjambre de neutrinos invisibles, y sólo una parte reducida de su masa esté en los átomos. Quizá

nuestro Universo visible es sólo un subproducto sin importancia de un Universo de neutrinos mucho más importante al cual no tenemos ningún acceso, pero cuyos campos gravitatorios crearon nuestros cúmulos y supercúmulos galácticos a partir de la sopa original. Quizá cada persona tiene diez veces su masa en el Universo fantasmal de los neutrinos. ¿Decide el Universo de neutrinos que nuestro Universo sea abierto o cerrado?

El borde brillante del Universo

¿De dónde llega la radiación de fondo cósmica que recibimos actualmente? ¿Dónde estaban los átomos que la emitieron y, sobre todo, cuándo se emitieron estos cuantos hacia nosotros? Sigamos la historia de nuestro Universo hasta un punto todavía más temprano y dejémonos guiar por los resultados del experimento mental que hemos llevado a cabo anteriormente. Volvamos a la época en la que el Universo tenía ya una primera historia de segundos y minutos y su temperatura era de sólo 4.000°K. Esto sucedía unos centenares de miles de años después del inicio. Todavía no había ningún átomo de hidrógeno. Los protones y los electrones volaban separados por el espacio. El Universo era opaco para la radiación. Los electrones desviaban continuamente los cuantos de luz y éstos tenían que seguir una trayectoria en zigzag por entre la materia fig. 12-3, izquierda). En promedio, cada 80 pc un cuanto chocaba con un electrón y se desviaba.

Supongamos ahora que estuviéramos situados en algún lugar de aquel incómodo Universo. ¿Qué veríamos? Nos llegarían de todas direcciones cuantos correspondientes a una radiación térmica de 4.000°K. Cada uno de estos cuantos habría estado en camino un promedio de 260 años, un breve intervalo comparado con las dimensiones del Universo. Cada cuanto de luz que llega hasta nosotros procede del lugar donde su trayectoria recta fue desviada por última vez por un electrón (fig. 12-3, centro). Al cabo quizá de cien mil años la temperatura ha bajado a 3.000°K. Ahora los protones y los electrones se unen

formando átomos de hidrógeno, ya no hay electrones libres que puedan impedir la propagación de los cuantos de radiación.

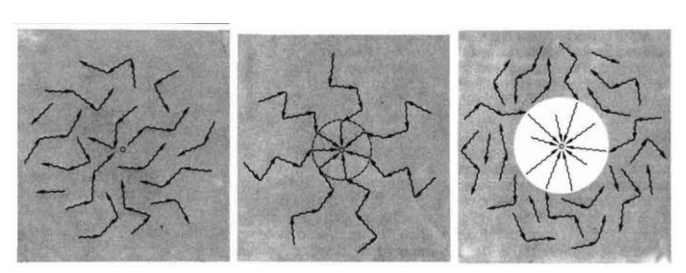


Fig. 12-3. Los cuantos de radiación describían en el Universo opaco líneas irregulares en zigzag (*Izquierda*, ver también la fig. 12-2 a la izquierda). Los cuantos de radiación que llegaban a un observador venían directamente de su entorno inmediato (*centro*). Cuando la temperatura del Universo descendió por debajo del umbral de los 3.000°K los electrones se acumularon a los protones y formaron con ellos átomos de hidrógeno. El Universo se volvió transparente. La luz se propaga con una velocidad finita, por lo tanto llegan al observador (punto central) cuantos de luz de la época en la que el Universo acababa de volverse transparente. Todo lo que está más cerca es visible, porque la luz que le llega de allí se emitió cuando el Universo era ya transparente (círculo blanco en la figura de la *derecha*) Lo que queda más lejos no puede verse.

Los cuantos de luz pueden atravesar libremente el espacio y el Universo se ha vuelto transparente. Ahora puede llegarnos también luz procedente de grandes distancias, pero la luz tiene una velocidad finita, por lo tanto al principio en el Universo transparente sólo recibimos radiación de lugares próximos. En el transcurso del tiempo nos llegan también cuantos de distancias mayores. Un milenio después de volverse transparente el Universo nos llegan los cuantos de luz emitidos desde mil años luz de distancia. Es decir, han estado en camino mil años y fueron emitidos exactamente cuando la materia se hizo transparente, o sea, cuando la temperatura era de 3.000°K. Así que recibimos radiación emitida a una temperatura de 3.000°K (fig. 12-3, derecha), procedente de una esfera que nos envuelve y cuyo radio es de mil años luz. Pero la materia se expande con

el Universo, por lo tanto la materia cuyos átomos emitieron estos cuantos de luz también se aleja de nosotros.

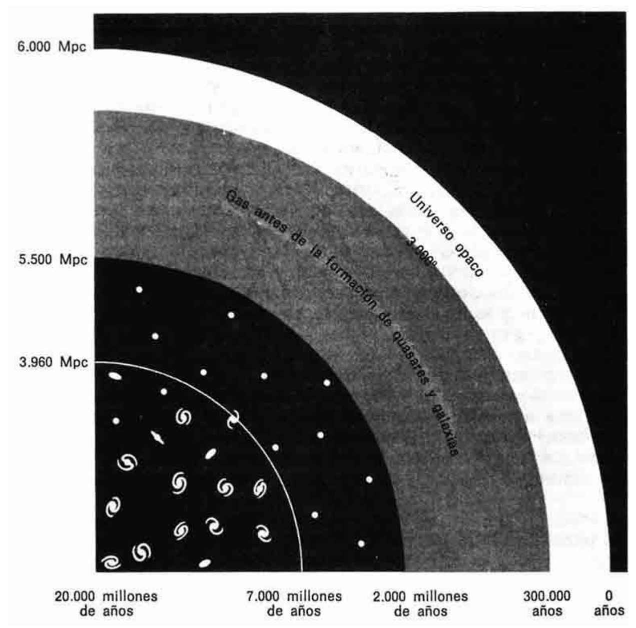


Fig. 12-4. Representación esquemática del Universo observado. Estamos en la esquina inferior izquierda de la figura y miramos hacia el espacio exterior, es decir, hacia el pasado. En el borde izquierdo está indicada la distancia a nosotros; en el borde de abajo la edad aproximada que tenía el Universo cuando se emitió la luz que nos llega hoy desde cada punto. La galaxia más alejada se ha dibujado a una distancia de 4.000 Mpc. Cuando la observamos, miramos a 13.000 millones de años en el pasado. Si suponemos que la edad del Universo es de 20.000 millones de años, cuando aquella luz fue emitida el Universo tenía sólo 7.000 millones de años. En los 5.500 Mpc vemos el Universo a la edad de 2.000 millones de años. Allí hemos dibujado el quasar más alejado de nosotros. A mayor distancia miramos materia que todavía no se ha agregado para formar quasares y galaxias. A mayor distancia todavía nuestra mirada choca con la cara interior de la pared opaca de 3.000°K (ver la fig. 12-3). Si fuera transparente, todavía podríamos ver luz que ha estado en camino hacia nosotros desde la gran explosión primigenia. (La figura no está dibujada a escala).

Así pues, la luz que recibimos está enrojecida por el efecto Doppler y enrarecida y parece emitida por un cuerpo de temperatura inferior (ver la página 151). En el transcurso de tiempos posteriores hemos recibido luz procedente de distancias cada vez mayores, luz que fue emitida cuando la materia se hizo transparente y que corresponde a una radiación térmica de 3.000°K. Pero esta luz llega de regiones más distantes todavía, que se han alejado de nosotros con velocidades todavía mayores. Es más roja, está más enrarecida y corresponde a una radiación térmica de temperatura más baja. En el curso de la historia del Cosmos hasta hoy se ha alejado de nosotros el horizonte visible, abriéndose camino en el espacio con la velocidad de la luz. Recibimos de él luz que fue emitida cuando la temperatura era de 3.000°K. Pero aquellas regiones están tan distantes que se alejan de nosotros con una velocidad próxima a la de la luz. La radiación que fue emitida con una temperatura de 3.000°K nos llega como radiación térmica de unos 3°K, debido al efecto Doppler y al de enrarecimiento. ¡Ésta es la radiación de fondo cósmica descubierta en 1965! Nos informa sobre la materia cósmica del origen del Universo, cuando la radiación y la materia se separaron y la radiación tenía una temperatura de 3.000°K.

Es como si estuviéramos en el centro de una esfera cuyo radio en años luz sea tan grande como el número de años transcurridos desde que el Universo se hizo transparente. No podemos ver más lejos porque allí el Universo era todavía opaco. Por lo tanto, nuestra esfera transparente está rodeada por el resto opaco del Universo. No es que el Universo a partir de una distancia determinada a nosotros sea todavía opaco. Pero cuando miramos hacia el espacio nos llega luz del pasado y vemos el fin de la fase de transparencia del Universo. Estamos pues en el centro del Universo visible para nosotros. Sin embargo, este punto no es el punto central del Universo. Es únicamente el punto central de nuestro horizonte.

Después del inicio de la fase de gran transparencia se formaron de algún modo a partir de la materia galaxias, cúmulos galácticos y supercúmulos. Pero la materia a partir de la cual se formaron y que vemos todavía hoy em.su estado original si

investigamos la radiación de fondo cósmica con el radiotelescopio no presenta nudos ni condensaciones. El Universo debió ser muy liso y uniforme; al parecer no tenía ni siquiera ligeras condensaciones que dieran origen a los grumos de materia observados actualmente.

Éste es pues nuestro Universo visible: galaxias y quasares en el interior de una esfera cuya superficie se aleja de nosotros a una velocidad tan próxima a la de la luz que su temperatura de 3.000°K nos parece mil veces más baja. Podemos considerar esta superficie como el borde del Universo visible. La radiación de fondo cósmica es la luz procedente del borde del Universo (fig. 12-4).

La paradoja de Olbers, por última vez

¿Por qué es negro el cielo nocturno? Hasta ahora la paradoja de Olbers nos informaba de que el Universo no podía estar lleno desde tiempo infinito y hasta distancias infinitas del espacio con galaxias inmóviles. Pero luego hemos sabido que el Universo tuvo un principio. No existen galaxias ni estrellas desde tiempo infinito. ¿Qué vemos pues cuando miramos el cielo nocturno?

Supongamos por el momento, para simplificar, que no hubiera ningún efecto de enrojecimiento y de enrarecimiento. Entonces veríamos galaxias, y a mayor distancia en el espacio quasares. Por grande que sea el número de galaxias y de quasares, es un número finito, y no alcanzan a taparnos la visión hacia fuera. No vemos discos estelares solapándose. Nuestra mirada pasa de largo y penetra todavía más en el espacio. A mayor distancia no descubriríamos ni galaxias ni quasares, pues veríamos el Universo en un estadio tan temprano que estos objetos no se habrían condensado a partir de la materia de la gran explosión primigenia. Si miráramos más lejos, es decir, en épocas más tempranas de la juventud de nuestro Universo, veríamos finalmente una pared opaca que brillaría con una temperatura de 3.000°K. Veríamos allí el momento en que el Universo se volvió transparente. Este sería pues el aspecto del

Universo si no existieran los efectos de enrojecimiento y de enrarecimiento: se verían galaxias y quasares brillantes, pero no en número infinito. Estos objetos están delante de una pared caliente y brillante de 3.000°K. El cielo nocturno, aparte de las galaxias y de los quasares, brillaría como si estuviera a 3.000°K. Pero los dos efectos citados desvían y debilitan la luz de los cuerpos celestes con mayor intensidad cuanto más lejos están de nosotros. La materia de la pared ardiente se aleja de nosotros con una velocidad próxima a la de la luz, y su radiación llega hasta nosotros en forma de ondas de radio en el dominio milimétrico y centimétrico. Nuestros ojos ven pues una pared negra como la pez. Hoy, pasados 20.000 millones de años, apenas queda nada del calor de la gran explosión primigenia. De noche vemos a simple vista la expansión del Universo.

Quisiera señalar aquí, para completar, que algunos astrofísicos se plantean la posibilidad de que la materia saliera fría de la gran explosión original. Hay que explicar entonces el origen de la radiación de fondo cósmica dentro de esta teoría. Podría ser que la materia fría se condensara dando una primera generación de estrellas. La materia se calentaría por primera vez en las estrellas. Las masas de polvo absorberían la luz que salía de aquella primera generación legendaria de estrellas y la reemitirían en forma de radiación infrarroja. Esta generación, enrojecida por el efecto Doppler, se nos presentaría hoy como la radiación de fondo cósmica en el dominio de las ondas milimétricas. Sin embargo, la mayoría de astrofísicos prefieren una gran explosión primigenia caliente a una explosión fría, entre otras cosas porque permite predecir la radiación de fondo cósmica y porque la abundancia del helio creado en la materia caliente en los inicios del Universo concuerda bien con la observada.

XIII. EL UNIVERSO PENSANTE

> BARBERINI: ...Vosotros pensáis en círculos o elipses y en velocidades uniformes, en movimientos simples adecuados a vuestros cerebros. ¿Qué pasaría si Dios hubiera querido que sus estrellas siguieran estas trayectorias? (Dibuja con el dedo en el aire una órbita muy complicada con velocidades irregulares.) ¿De qué servirían vuestros cálculos?
>
> GALILEI: Querido señor, si Dios hubiese construido así el Universo (repite la órbita de Barberini), habría construido así nuestros cerebros (repite la misma órbita), de modo que éstos considerarían precisamente estas trayectorias como las más simples.
>
> BERTOLT BRECHT,
> *La vida de Galilei*

El Universo no es solamente el espacio casi vacío con sus galaxias y quasares, no es solamente la materia informe anterior a la gran transparencia. También nosotros, formados a partir de los átomos creados poco después de la gran explosión primigenia, somos el Universo, y apenas ahora hemos comenzado a pensar sobre este Universo del cual somos una pequeña parte. Quizás aparte de nosotros haya también otras formas de la materia universal capaces de pensar. El Universo ha comenzado a pensar sobre sí mismo.

Sin galaxias hubiese sido imposible pensar nada, puesto que sin ellas no habría estrellas, sin estrellas no habría planetas, y sin planetas no existiríamos nosotros.

¿De dónde proceden las galaxias y los quasares?

El borde del Universo, que vemos gracias a la radiación de 3°K, está tan lejos de nosotros que la materia que contiene se aleja de nosotros prácticamente a la velocidad de la luz. Es evi-

dente que todas las galaxias y quasares están más cerca de nosotros, en la región transparente del Universo. Probablemente nacieron después, una vez liberados los cuantos de radiación de su prisión electrónica.

Creemos saber de qué modo la materia se condensó formando objetos más compactos. Cuando en un gas que llena de modo uniforme el espacio se crea repentinamente en un punto una pequeña condensación, la gravedad atrae hacia sí más materia, y la condensación se refuerza. Una vez iniciado este proceso ya no puede pararse. Mientras el Universo era todavía opaco (recordemos que en aquel entonces la radiación desempeñaba todavía el papel predominante), la materia sólo podía condensarse si aceptaba la radiación incluida en ella, y también la radiación debía condensarse. Pero la radiación constituye un medio muy difícilmente compresible que se defiende con intensas fuerzas de presión. Por lo tanto, la radiación en la fase opaca del Universo se opuso a la formación de concentraciones de materia condensada. Más tarde, cuando el Universo se hizo transparente, la materia pudo condensarse sin que la radiación tuviera que comprimirse simultáneamente. La radiación dejó de inhibir la condensación. Por eso creemos que la materia formó progresivamente galaxias y quasares a partir de pequeñas irregularidades iniciales.

Por desgracia esta teoría tiene un pequeño defecto. No es que faltaran de entrada irregularidades. Los movimientos mutuos de los átomos bastaban para que hubiera siempre puntos con densidad de materia algo superior a otros. Se necesitaba también un cierto tiempo para crear una galaxia entera a partir de una pequeña condensación inicial de materia. Cuanto más pequeña es la perturbación inicial, más tarda en formarse algo grande a partir de ella. Las oscilaciones aleatorias de densidad son demasiado pequeñas. Si en el Universo sólo hubiese habido estas oscilaciones, no se habría formado hasta ahora ni una sola galaxia.

Pudieron formarse galaxias y cúmulos galácticos en un intervalo razonable de tiempo si al principio de la fase de gran transparencia existían oscilaciones de densidad de por lo menos una décima por ciento. Pero estas oscilaciones de densidad

son tan intensas que no pudieron nacer casualmente. Era muchísimo más difícil todavía que aparecieran en el Universo todavía opaco, cuando la radiación cerraba el paso a la compresión.

No queda pues otra salida que suponer con el astrofísico soviético Yakov Zeldovich que las oscilaciones de densidad estaban ya presentes en la gran explosión primigenia. No es desde luego muy satisfactorio cargar con la responsabilidad a Dios y suponer que cuando formó el Universo también proporcionó las fluctuaciones de densidad que más tarde crearon las galaxias. Pero si en el inicio del Universo ya había fluctuaciones de densidad, la materia tenía que estar distribuida de modo no uniforme cuando la sopa original se volvió transparente. Es importante pues comprobar si la radiación de fondo cósmica es realmente isótropa. Si la materia presentó oscilaciones de densidad desde el inicio, y también por lo tanto en la fase opaca del Universo, deberíamos reconocer cierta estructura de manchas en la pared interior de esta esfera de 3.000°K que se aleja tan rápidamente de nosotros que vemos su luz en forma de radiación de 3°K.

Si prescindimos de la irregularidad de la radiación de fondo cósmica debida al viento de marcha que provoca nuestro movimiento por el espacio (ver la pág. 322), no pueden percibirse en ella manchas que indiquen la existencia de condensaciones de intensidad suficiente presentes en la sopa cósmica original cuando se produjo la fase de gran transparencia.

Nuestros conocimientos sobre el origen de las galaxias están pues todavía en un estado muy desolado.

Apenas mejoran si suponemos que los neutrinos tienen una masa en reposo tan grande que dominan actualmente el Universo. Podrían haberse condensado con la materia y la radiación en la fase opaca del Universo, pero esta no uniformidad debería observarse actualmente en la radiación de 3°K. Pero los neutrinos más bien reprimen lo que pudo suceder en la fase de transparencia. Si queremos explicar nuestras galaxias actuales, hay que suponer la existencia desde el inicio de la fase de transparencia de nudos de densidad tan intensos que deberían poder observarse todavía hoy en la radiación de 3°K. De hecho

los neutrinos no pudieron participar con tanta facilidad en las crecientes oscilaciones de densidad. Si se tiene una condensación de materia y de neutrinos, los neutrinos escapan de nuevo con mayor velocidad y queda solamente la concentración de densidad de la materia atómica. La velocidad con que aumenta la acción de la gravedad depende de la distribución relativa de *toda* la materia, formada por la masa en reposo de los átomos y de los neutrinos. Puesto que los neutrinos no se condensan con tanta facilidad, se precisan oscilaciones iniciales de la densidad de la materia atómica más intensas para que la formación de las galaxias concluya en el tiempo disponible. Las oscilaciones de densidad deberían reconocerse en la estructura de manchas de la radiación de 3°K.

Pero una vez formadas las galaxias, la gravedad se hace tan intensa en su entorno que alrededor de cada cúmulo galáctico o supercúmulo se reúne un enjambre entero de neutrinos. Quizá la mayor parte de la masa de nuestra galaxia no esté contenida en la materia visible sino en un halo de neutrinos creado por nuestra galaxia Vía Láctea y por las galaxias del grupo local y del cúmulo de Virgo. Por desgracia esto no nos ayuda a resolver el problema de la formación de nuestra Vía Láctea a partir de la sopa cósmica materia-radiación.

Hasta ahora nadie ha proporcionado una teoría de la formación galáctica convincente y que encaje con todos los hechos observados. Como en tantos lugares de esta obra, nos encontramos en las fronteras de nuestros conocimientos y de nuestra comprensión actuales. Creo que no deberíamos quejarnos. Una ciencia sólo está viva si se topa en ella con problemas irresueltos. Cuando sus ideas se sustituyen en rápida sucesión por otras nuevas y mejores, el hecho es en general síntoma de que la ciencia no se ha hecho estéril.

¿Por qué es liso el Universo?

La radiación de fondo cósmica parece ser uniforme con mucha precisión, si prescindimos del viento de marcha debido a

nuestro movimiento por el espacio. Hoy sabemos que en la pared de la frontera entre el Universo transparente y el opaco no hay pintado ningún signo, no hay ninguna mancha o grano cuya luminosidad sea superior en unas centésimas de un uno por ciento a la de su entorno. Quizá la radiación de fondo es todavía más uniforme, pero de momento no podemos medirla con mayor precisión. Parece que la explosión primigenia estalló con gran precisión proyectándose en todas direcciones con igual intensidad. Quien haya dado origen entonces al Universo apuntó en todas direcciones con igual precisión.

La radiación de fondo permite deducir que el Universo continúa siendo actualmente uniforme. Si su curvatura no fuera igual en todas partes, la radiación de fondo que nos llega desde distintas direcciones se concentraría o se dispersaría al pasar por las deformaciones del Universo, que actuarían como una enorme lente. No sería isótropa. Las galaxias y los cúmulos galácticos son desde luego irregularidades que deforman el Universo, pero constituyen pequeñas «rugosidades» o «asperezas», como los poros en la superficie de una naranja. La radiación de fondo nos dice que el Universo en grande tiene la misma curvatura a pesar de las pequeñas arrugas de las galaxias.

Uno puede preguntarse por qué el Universo es tan «liso» como lo vemos hoy. Dos físicos de Cambridge, Berry Collins y Stephen Hawking, estudiaron el tema en 1973. Quisiera dedicar aquí unas palabras a uno de los dos autores. Stephen Hawking es uno de los investigadores más imaginativos de nuestra época en el dominio de la teoría de la gravitación. Desde hace más de diez años una grave enfermedad le tiene atado a la silla de ruedas y sólo con dificultades puede su mano tocar los controles de su motor eléctrico. Le cuesta articular, y en sus conferencias necesita un «intérprete» que «traduzca» en voz alta sus palabras al público. Sin embargo, Hawking es muy productivo, viaja de congreso en congreso y hace públicas sus ideas. Collins y Hawking se preguntaron si debíamos extrañarnos de que nuestro Universo fuera tan uniforme. ¿Procede esta uniformidad de la gran explosión primigenia? Los dos físicos han investigado varios modelos de Universo inicialmente no

isótropos. Su movimiento después de salir la materia de la explosión primigenia no seguía un curso tan uniforme como el prescrito por la ley de Hubble, sino que era irregular, como el agua de un grifo abierto del todo. Collins y Hawking siguieron con ayuda de la teoría general de la relatividad las transformaciones en el curso del tiempo de estos distintos modelos de universos de inicios turbulentos.

Clasificaron sus universos en clases que corresponden a las tres clases de los modelos de universos «lisos» de la figura 8-4. Los modelos en los que el impulso inicial es demasiado pequeño y que por lo tanto entran rápidamente en colapso conservan su irregularidad hasta el fin del Universo. La radiación de fondo no es isótropa. Es evidente que nuestro Universo no es de este tipo.

Luego investigaron los modelos de Universo que se expansionan indefinidamente con mucho impulso inicial. En tales modelos las irregularidades iniciales no mueren, sino que incluso se refuerzan. Estos modelos no se vuelven nunca uniformemente lisos, y la radiación de fondo se mantiene manchada. Tampoco es nuestro Universo uno de ellos.

El tercer tipo de modelos de Universo ocupa un lugar intermedio. El impulso original y la masa total de la mezcla materia-radiación están dimensionados de tal modo que el Universo no vuelve a entrar en colapso, pero en el transcurso del tiempo se expansiona cada vez con mayor lentitud. En un Universo así las irregularidades disminuyen con el tiempo y la radiación de fondo se hace uniforme. Esto estaría conforme con nuestro Universo. ¿Es pues nuestro Universo liso porque en el principio el impulso inicial y la gravitación se compensaban de tal modo que nació un Universo con una radiación de fondo isótropa? Parece una gran casualidad que nuestro Universo haya tenido estas condiciones iniciales improbables, que desembocan en un cosmos liso.

Collins y Hawking soslayaron el problema de por qué vivimos en un Universo que tiene una radiación de fondo isótropa y que por lo tanto es muy improbable, recurriendo a un argumento que no es de fácil comprensión conceptual. Supusieron un gran número de universos imaginables, nacidos todos ellos

con movimiento irregular de una gran explosión primigenia. Luego siguieron la evolución temporal de estos modelos de Universo.

Nosotros estamos aquí porque el Universo es liso

Algunos de los universos imaginables de Collins y Hawking entraron rápidamente en colapso. No tuvieron tiempo de formar galaxias. Los universos que se expanden para siempre presentan irregularidades crecientes, pero la materia se expande tan rápidamente que la gravitación no puede formar ninguna galaxia. Queda pues el Universo situado entre ambos extremos. En él la radiación de fondo es isótropa. Este Universo se expande durante un tiempo infinito, por lo tanto dispone de tiempo suficiente para formar galaxias reales. El movimiento de expansión es tan lento que la gravedad permite formar galaxias a pesar del movimiento centrífugo.

Collins y Hawking llegan pues a la conclusión de que los únicos tipos de Universo en los que se forma una radiación de fondo isótropa son al mismo tiempo los universos en los que se forman galaxias y que por lo tanto pueden dar nacimiento a la vida. En las formas de Universo cuya radiación de fondo no es uniforme, nosotros no existimos. No hay nadie allí que pueda percibir un Universo y su radiación de fondo irregular. Ya no debemos pues extrañarnos de la uniformidad de la radiación de fondo. Las galaxias y en ellas los hombres sólo pueden nacer en un Universo donde con el tiempo se amortiguan las irregularidades que no desembocan en la formación de galaxias. Estamos aquí porque el Universo es liso. Si el Universo no fuera actualmente isótropo, no habría galaxias ni nadie que pudiera observar su anisotropía. Yo soy porque el Universo es isótropo. Sólo un Universo con radiación de fondo isótropa aprende a pensar. ¿Por qué extrañarse entonces de la isotropía observada?

¿Qué había antes?

Se nos plantea involuntariamente esta frase cuando comprendemos que todo el Universo nació en un pasado finito de una gran explosión. Sin embargo, debemos aclarar primero qué queremos decir con ello. Imaginemos la explosión primigenia siguiendo el curso regular del tiempo en la vida diaria. Más o menos lo siguiente: A las 11,59 horas no existía ningún Universo, y tampoco a las 11,59 horas y 59 segundos existía ni pizca de radiación ni desde luego materia. La cosa empezó a las doce con un gran destello y una densidad infinita. Luego todo se expandió y se enfrió. En esta representación la pregunta antes planteada sería: ¿Qué había a las 11,59 horas y 50 segundos? Esta pregunta presupone la existencia de un reloj que permite determinar aquel momento; no es preciso que sea un producto de la moderna industria relojera, bastaría un único átomo donde tuvieran lugar procesos periódicos, quizá vibraciones que permitieran medir intervalos de tiempo. Pero antes de las doce no existía nada que pudiera darnos la hora. La pregunta sobre lo que había antes de la gran explosión primigenia carece de sentido desde el punto de vista físico, porque también el tiempo empezó con la explosión primigenia. Quien se pregunta por un antes, es como un hombre plano que quiere saber cosas sobre el Universo de fuera de su superficie cósmica.

La sensación insatisfactoria que nos embarga cuando intentamos aceptar que no debemos preguntar sobre el antes, puede explicar la aceptación de un modelo de Universo que soslaya esta dificultad. Es un Universo en el cual no hay sólo una explosión primigenia, sino un número infinito de ellas. De hecho puede montarse un Universo *oscilante* a partir de los modelos de Universo que describen un Universo que entra de nuevo en colapso. La cosa se remonta a Friedman. En él (fig. 13-1) la implosión del mundo es seguida por una nueva explosión. Antes de cada explosión primigenia había un Universo previo, que nacido de otra explosión primigenia había entrado de nuevo en colapso. En tal caso preguntarse sobre un antes no supone ninguna dificultad conceptual.

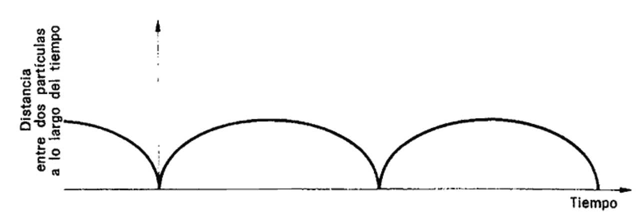


Fig. 13-1. Distancia de dos partículas materiales en el Universo cíclico. La materia, que parte de una gran explosión primigenia, se separa, pero luego la gravedad la condensa de nuevo y acaba en una implosión a la cual sigue inmediatamente una nueva explosión primigenia. Un ciclo sigue al otro desde tiempo infinito y hasta tiempo infinito.

¿Pero se ha ganado realmente algo? Son imaginables dos casos. En el primero no pasa ninguna información del ciclo anterior al siguiente. Pero esto significa que en el ciclo siguiente no hay el menor indicio de que existiera antes otro Universo. Ninguna noticia consigue pasar por la gran explosión primigenia. ¿En qué se diferencia esto de nuestra imagen de una simple explosión primigenia? En principio no dispongo de ningún medio para saber algo del Universo anterior, por lo tanto tampoco existe para mí.

Pero también es imaginable que cada explosión primigenia sea algo más caliente que la anterior, o que sea sucesivamente más fría. En tal caso el Universo evolucionaría al pasar de ciclo en ciclo por las fases de implosión y de expansión, y la historia del ciclo anterior influiría sobre el siguiente. Si en un Universo así la física o una física mejorada en comparación con la nuestra se mantiene válida durante la fase de máxima compresión y transmite información al ciclo siguiente, la cuestión de lo que había antes en cada ciclo tiene un sentido. Este Universo existe desde tiempo infinito. Explota e implosiona de nuevo. Se salvaría y se transmitiría información de un ciclo al siguiente a través de cada fase de densidad y temperaturas infinitas.

Para poder decir algo sobre un Universo así deberíamos saber qué física es válida en la fase de máxima compresión. Significa esto plantearse qué leyes de la naturaleza eran válidas en

la proximidad inmediata de la gran explosión primigenia, o sea plantearse la física del ombligo del tiempo.

En el ombligo del tiempo

¿Qué sucedió en el instante de la explosión primigenia? Es imposible que entonces las cosas fueran como debieran, si al decir «como debieran» nos referimos a nuestras leyes actuales de la naturaleza. La teoría general de la relatividad afirma que todo empezó con una densidad infinita. La radiación de fondo cósmica hace suponer que en el principio la temperatura era infinita. Cuanto más nos acercamos a este principio más inseguras se hacen nuestras leyes de la naturaleza y acaban fallando cuando la densidad y la temperatura son infinitas.

Chocamos con muchas dificultades. Podemos suponer que la teoría de Einstein es válida hasta los mismos inicios del tiempo, pero entonces ignoramos cómo se comporta la mezcla de materia y radiación cuando la compresión es tan alta. Ésta es la primera dificultad. Los físicos han descubierto en los últimos tiempos nuevos puntos de partida para el problema. Utilizan las teorías de campo que describen por ejemplo cómo pueden nacer pares de partículas a partir de cuantos de radiación y cómo se forman racimos enteros de partículas elementales cuando en los aceleradores chocan partículas de gran energía, y estudian las nuevas predicciones que formulan estas teorías suponiendo que todo tiene lugar en los campos gravitatorios de la explosión primigenia. Se confía de este modo fundamentar la repulsión cosmológica cuya intensidad en la teoría de Einstein es todavía indeterminada (ver la pág. 163). Quizás esta fuerza tuvo un papel decisivo en las primeras fracciones del Universo y quizá sea la fuerza que en sus inicios dio el impulso original a la materia, impulso que todavía hoy observamos en el movimiento de expansión de las galaxias.

Quizá los físicos podrán en el futuro dominar esta primera fase del Universo y ampliar de tal modo la física que puedan comprender las fracciones del primer segundo que siguió a la

gran explosión. Esta física tan distinta de los inicios del Universo es quizá la responsable de que tengamos hoy en día un Universo isótropo. Quizá resolvería un enigma que nos ha impresionado desde hace tanto tiempo.

Si observamos la radiación de 3°K en dos direcciones opuestas del espacio, estaremos mirando dos puntos de la pared muy alejados entre sí. Vemos en ellos el final de la fase opaca del Universo, una época en la que tenía ya unos 300.000 años de edad. La radiación de estos dos puntos ha tardado casi la edad entera del Universo en llegar a nosotros. Estos dos puntos no se han visto nunca, puesto que la luz necesita un tiempo equivalente a dos edades del Universo para ir del uno al otro. Por lo tanto, ninguno de los dos sabe nada del otro. Dicho con algo más de precisión: una acción causal no puede alcanzar ninguno de estos puntos desde el otro. No pueden haberse igualado entre sí. Y sin embargo, en cuanto a la luz de la radiación de fondo, los dos puntos se parecen como un huevo al otro. Quizá la solución del enigma está en aquellos primeros instantes del Universo, cuando todavía era válida una física totalmente distinta, que apenas empezamos hoy a conocer.

Parece muy dudoso que la teoría de Einstein sea válida hasta la misma explosión primigenia. Recordemos que Einstein sólo formuló su teoría para describir campos gravitatorios débiles, como se observan en la Tierra y en el Sistema Solar. No podemos esperar que continúen siendo válidos en condiciones tan extraordinarias como las que dominaban en el inicio del Universo. Es seguro que la teoría debe modificarse cuando nos acercamos a una fracción de segundo de la gran explosión primigenia que corresponda a un uno dividido por un número de cuarenta y cuatro cifras. Si nos acercamos más al Gran Inicio, hay que acoplar la teoría gravitatoria con la mecánica cuántica. Nadie sabe hoy en día cómo tendría que hacerse esto.

Cuando el Universo se precipitó en la física

Cuando discutimos en el capítulo 7 los modelos de Universo imaginables, parecía que la explosión primigenia fuera un acontecimiento obligatorio. Parecía como si sólo hubiera los tres tipos de soluciones «lisas» (figura 8-4) discutidas allí, de modo que la naturaleza no tuviera otra opción que empezar con una gran explosión. Esto no es cierto. Vimos ya que Collins y Hawking han discutido otros modelos «con deformaciones», emparentados sin embargo con los tres tipos. Pero la teoría de la relatividad permite también modelos de Universo en los que las galaxias vienen del infinito y se acercan velozmente unas a otras. En tal caso la densidad media en los inicios del Universo era nula. No nos interesamos por estos modelos porque observamos que el Universo en lugar de *concentrarse* se *expande*. Sin embargo, me parece importante constatar que quien dio origen al Universo, sea quien fuere, tuvo que elegir.

Me interesa hablar aquí de la separación entre la balística einsteiniana, relativamente trivial, y el estado inicial. Si alguien recibe una pedrada puede descubrir con ayuda de la balística de dónde partió la piedra y con qué velocidad la tiraron. Pero la balística no nos dice por qué tiraron precisamente desde allí la piedra, por qué lo hicieron y quién lo hizo. Esto queda fuera de la balística. Del mismo modo el estado inicial del Universo queda fuera de la física. ¿Quién fue el que proyectó el Universo dentro de la física? ¿Está permitida en definitiva esta pregunta? La física no puede decirnos nada al respecto, del mismo modo que la balística no puede revelamos el nombre del tirador que apuntó hacia nosotros. Desde el punto de vista de la ciencia natural no podemos responder a la pregunta sobre la causa y el causante.

Me preguntan una y otra vez en mis conferencias si en la concepción científica del Universo queda lugar todavía para Dios. A menudo quien pregunta sustituye la última palabra por un vergonzante «ser supremo». Cuanto más pienso sobre ello menos entiendo que los conocimientos científicos deban suprimir las ideas de la fe. Muchas personas piensan que la ciencia en su avance continuo progresa victoriosamente empujando sin

consideración a la religión hacia posiciones de defensa situadas cada vez más lejos de su frente inicial, hasta que no le quede ya más lugar. Antes el Sol y la tormenta estaban en manos de los dioses, pero ahora se sabe muy bien cómo funciona el Sol y qué sucede cuando los campos eléctricos de la atmósfera terrestre se hacen tan intensos que se produce una ionización de choque y salta un relámpago. Parece como si la naturaleza, privada de su libertad, se integrara cada vez más en las leyes naturales. Parece como si la naturaleza tuviera que seguir un curso casi automático como el de un reloj, y parece como si no quedara ya lugar para Dios.

¿Tuvo Dios que tomar decisiones solamente en el instante de la gran explosión primigenia y sigue luego su curso el Universo según leyes férreas de modo casi automático, quizá con el único margen de maniobra permitido por la incertidumbre de las leyes naturales, como las que impone la mecánica cuántica? ¿Ha de intervenir Dios únicamente cuando debe decidir si un determinado átomo de radio se desintegrará hoy o mañana, pero con la salvedad de respetar por lo menos estadísticamente el valor fijado para la semivida de este tipo de átomo? ¿Interviene en nuestros pensamientos y sensaciones o también esto funciona como un reloj casi preprogramado, con la excepción de las indeterminaciones estadísticas del dominio atómico y molecular?

¿Determinan las leyes de la naturaleza el Universo?

Yo personalmente tengo dificultades con la concepción de que las leyes de la naturaleza determinan el curso del Universo. ¿Qué significa que el Universo obedezca las leyes de la naturaleza? Esta frase es para mí tan incomprensible como la que afirma que el Universo es un caos. Nosotros observamos procesos en la naturaleza y mediante la observación continuada durante milenios hemos podido elaborar reglas que nos permiten formular predicciones, por ejemplo profetizar eclipses de Sol o de Luna o predecir dónde caerá una piedra después de

tirarla. Pero las reglas que llamamos leyes de la naturaleza están únicamente en nuestros cerebros. Cuando decimos que la naturaleza obedece leyes, esto significa únicamente que nosotros podemos describir los procesos observados mediante reglas simplificadas que hemos inventado y puesto a prueba. Sin hombres no hay leyes de la naturaleza. Es una propiedad de nuestro cerebro que con él podamos formular reglas, y que luego tengamos la sensación que la naturaleza las sigue. ¿Están las leyes de la naturaleza fuera de nosotros o las introducimos con nuestro pensamiento en la naturaleza? Nuestro cerebro se ha adaptado tanto al entorno, que tenemos la sensación de que lo comprendemos. La cita de la *Vida de Galilei* de Brecht reproducida al principio del capítulo me parece que da exactamente en el clavo. Nuestro cerebro ha evolucionado de tal modo que es capaz de considerar sencillos los procesos de la naturaleza, es decir, de creer que obedecen unas leyes naturales. ¿Pero quién precipitó el Universo dentro de la física? Esta fue mi pregunta inicial. ¿No sería más correcto preguntar: quién precipitó la física dentro del Universo? ¿Y no fuimos nosotros mismos?

Es difícil con este concepto de las leyes de la naturaleza creer que el progreso de la ciencia natural pueda eliminar la religión. Según este concepto las leyes naturales son únicamente ayudas para hacer comprensible la naturaleza a nosotros mismos y no preceptos que deban regir la naturaleza.

Vemos partículas en la naturaleza y reconocemos fuerzas entre ellas que llamamos *interacciones*. Las ordenamos según su intensidad y descubrimos cuatro tipos: las cuatro interacciones de la física. Concedemos premios Nobel a quienes demuestran que dos de estas fuerzas son en realidad la misma convirtiendo así las cuatro fuerzas en tres. Tenemos preparados premios Nobel para quienes reduzcan todavía más el número de tipos distintos de interacción. Podemos imaginar que en nuestro Universo existan otros seres pensantes capaces de hacer predicciones sobre la naturaleza mucho mejores que las nuestras (suponiendo que lo consideren digno de su atención) y cuyo pensamiento siga un curso muy distinto del nuestro. Qui-

zás a ellos las partículas del mundo inanimado y sus interacciones no les parezcan conceptos sencillos. Quizá los grupos enteros de partículas les parecen más sencillos que las partículas solas y quizá descubran así otras leyes de la naturaleza para sus construcciones conceptuales, no porque observen otra naturaleza, sino porque su pensamiento es distinto.

Hay toda una serie de argumentos contrapuestos a esta concepción que he formulado aquí quizá con una cierta exageración, argumentos que en ocasiones me han planteado algunos colegas. Tenemos en primer lugar la sensación de que la regularidad de la naturaleza existe en el Universo con toda objetividad como si de decenio en decenio fuéramos adivinando más párrafos del código cósmico. Tengo todavía muy vivo en la memoria el recuerdo de mis primeros pasos en la investigación matemática. Me pareció como si en el diminuto dominio donde toqué tierra virgen hubiera descubierto una regularidad preexistente. En una ocasión expliqué a un amigo mis sensaciones de esta manera: «Me parece como si alguien hubiera pensado antes lo que acabo de descubrir.»

Contra la teoría de que las leyes de la naturaleza están únicamente en nuestro cerebro puede objetarse que los medios que permiten explicar un fenómeno a menudo ayudan a comprender otros cuya existencia se desconocía totalmente.

Un ejemplo al respecto es que Friedman tuviera que convencer a los demás de que su teoría permite universos en expansión años antes de que Hubble descubriera la fuga de las nebulosas espirales. Otro ejemplo se remonta también a los años veinte. Cuando se desarrolló la mecánica cuántica, se pudo utilizar un aparato matemático creado más de cien años antes para describir cuerdas y membranas en vibración y la propagación del sonido en el aire, a saber, la ecuación de ondas. Esto parece apoyar la idea de que el Universo obedece unas regularidades que existen fuera de nosotros.

Para la exploración práctica del mundo es desde luego indiferente inclinarse, como yo, a pensar que proyectamos mentalmente en el Universo las leyes de la naturaleza o suponer que nacieron con la gran explosión primigenia y que luego han persistido para siempre. Tampoco me parece importante para

el tema de la interacción entre religión y ciencia saber si las leyes de la naturaleza existieron desde siempre (sin que pueda decirse muy bien qué significa esto) o si las proyectamos nosotros mentalmente en el Universo. Nunca podremos decidirlo.

En todo caso la ciencia comprende sólo una parte finita del Universo, infinitamente múltiple en sus interacciones. Puede ser que la investigación progrese de decenio en decenio, pero nunca alcanzará su objetivo infinitamente lejano. Sin embargo, ¡qué minúscula es la parte del Universo que la ciencia puede abarcar! Nosotros pensamos, vivimos y sentimos más de lo que pueda comprenderse nunca con la biología, la química y la física. A un padre cuyo hijo muere atacado por un rayo al escalar el Zugspitze le es indiferente que nosotros podamos explicar exactamente con qué intensidad de campo y bajo qué circunstancias dadas la ionización de choque genera un rayo. Ninguna ciencia de la naturaleza le ayudará a enfrentarse con el golpe del destino.

Si las leyes de la naturaleza son quizás una simple proyección de nuestras mentes en el Universo, ¿qué valor pueden tener nuestras consideraciones sobre el origen de este Universo? ¿Cómo nos atrevemos a aplicar a la etapa anterior del Cosmos unas leyes que acabamos de inventar, y a afirmar que sabemos cómo era el Universo mucho antes de que pudieran existir seres pensantes, antes incluso de que hubiera el primer átomo? Debemos formular pues con mayor precisión a qué se refieren los cosmólogos cuando hablan de los inicios del Universo. Nosotros observamos el Universo hoy, vemos cómo se expande, reconocemos galaxias y quasares. Nos apoyamos en nuestras leyes naturales que nos permiten describir muchos fenómenos observados actualmente y con los cuales podemos hacer predicciones en muchos dominios de la naturaleza. Si aplicamos estas leyes al Universo actual no podemos resistir la tentación de trasladarlas también al pasado. Entonces se nos impone con fuerza la imagen de la gran explosión primigenia. En favor de esta concepción hablan dos predicciones importantes que derivan de ella y que pueden comprobarse *a posteriori:* la existencia de la radiación de fondo cósmica y la abundancia correcta

del elemento helio en la materia cósmica no contaminada todavía por el metabolismo estelar (ver la pág. 336). Esto debería animarnos a creer que la imagen de los inicios del Universo creada por los cosmólogos tiene sentido. Digo que tiene «sentido» y no que es «correcta», porque ignoro lo que significa esta última expresión, ya que es fundamentalmente imposible demostrar la verdad.

El Universo en tiempo acelerado

Lo que hemos descubierto estudiando el Universo proporciona una imagen de aspecto coherente cargada de detalles, aunque éstos no se entiendan del todo. ¿Demostrará en el futuro su coherencia a grandes rasgos esta imagen, o habrá que cambiar pronto de ideas porque observaciones nuevas y más refinadas entren en contradicción con ella?

Al describir la historia del Universo se ha recurrido a menudo al sistema del tiempo en movimiento acelerado. En lo que sigue voy a seguir la explicación del físico Peter Kafka[19].

«Comprimamos la historia del Universo en el intervalo de un año. Imaginemos que es la noche de Año Nuevo y que esperamos que den las doce campanadas anunciando el año siguiente...

»Hace exactamente un año todo lo que ahora vemos en forma de Universo estaba totalmente comprimido ocupando quizás un único punto. La sustancia original, una radiación que ocupaba el espacio uniformemente con una densidad y temperatura enormes, no tenía todavía ningún tipo de estructura, y gracias al impulso recibido en la misteriosa explosión original se expandía desde entonces en todas partes contra su gravedad, enfriándose en el proceso. Las leyes de la naturaleza —sean éstas lo que sean— y las reglas de la estadística fuerzan la aparición y desarrollo de estructuras. Nace ya la materia en una minúscula fracción del primer segundo del día primero de

---

[19] Peter Kafka, Heinz Maier-Leibnitz. *Streitbriefe über Kernenergie*. Munich/Zurich 1982.

enero: son las partículas elementales, e inmediatamente a continuación los núcleos atómicos más sencillos, hidrógeno y helio. Continúan la expansión y el enfriamiento, y la densidad de esta materia disminuye más lentamente que la de la radiación, con lo que en algún momento del día uno o dos de enero la materia adquiere la supremacía. Cuando la temperatura ha bajado a unos cuantos miles de grados, la materia empieza a formar agregados obligada por su propia gravedad. Así, antes de fines de enero nacen las galaxias y en ellas las primeras generaciones de estrellas.» Kafka describe luego la formación de los elementos pesados en estrellas pertenecientes a generaciones estelares que precedieron a nuestro Sol.

«Ahora... ha pasado más de medio año y a mediados de agosto nuestro Sistema Solar se condensa a partir de una nube de gas y polvo en contracción. Al cabo de sólo un día el Sol ha alcanzado más o menos su estado actual y proporciona a sus planetas una corriente de radiación bastante constante.»

Ahora existe la posibilidad de que nazca la vida primitiva en la Tierra: «Ya a principios de octubre encontramos algas fósiles, y en el transcurso de sólo dos meses aparece, primero en las aguas, una enorme multiplicidad de especies vegetales y animales. Los primeros fósiles vertebrados se remontan al 16 de diciembre. El día 19 las plantas conquistan los continentes. El 20 de diciembre las masas terrestres se cubren de bosques y la vida se crea una atmósfera rica en oxígeno. Ahora la luz ultravioleta queda retenida haciendo posible la aparición de formas de vida todavía más complejas y más sensibles. El 22 y el 23 de diciembre, mientras se forman nuestros yacimientos de carbón piedra, evolucionan animales anfibios de cuatro patas a partir de peces pulmonados y conquistan las tierras húmedas. El 24 de diciembre evolucionan a partir de ellos los reptiles, que colonizan también la tierra seca. El 25 de diciembre se inventa la sangre caliente. Por la noche aparecen los primeros mamíferos, pero durante los siguientes dos días viven una existencia precaria junto a los saurios. (La inteligencia se prepara en nichos, a escondidas de los poderosos.) El 27 de diciembre evolucionan las aves a partir de los reptiles, y el 28 y el 29 ellos,

junto con los mamíferos, toman el poder de manos de los dragones en extinción. En la noche del 29 al 30 empieza el plegamiento todavía no finalizado de las montañas de su patria, que desde entonces está situada en el cinturón sísmico de la Tierra. (Kafka, en esta conferencia celebrada en Austria, se refiere a los Alpes. R. K.)

»Hasta ahora la información genética se almacenaba principalmente en los llamados genes, es decir, en las moléculas de los ácidos nucleicos. A partir del 30 de diciembre el almacenamiento en estructuras proteínicas mayores del cerebro permite superar de modo esencial la fijación genética. La posibilidad de entrelazamiento de las neuronas del cerebro ofrece nuevos medios de expresión al impulso hacia la complejidad creciente: aprender se convierte en algo importante, el alma y el intelecto pueden ya desarrollarse. En la noche del 30 al 31 de diciembre, la noche pasada, brota la rama humana del tronco que lleva a los antropoides actuales. Sólo nos queda un día para evolucionar. No parece que sea difícil, pues cada segundo pasan veinte generaciones. Pero nuestra evolución está escasamente documentada. Los restos de esqueletos de la garganta de Olduvai son de las diez de la noche de Año Nuevo. Los hombres de Neanderthal aparecen cinco minutos antes de las doce de la noche; sus cerebros ya son comparables a los nuestros. Dos minutos antes de las doce estamos sentados alrededor del fuego, balbuceamos y aullamos y damos palmadas rítmicas, pintamos las paredes de nuestras cavernas con imágenes de nuestras presas y depositamos armas o miel y grano en las tumbas de nuestros padres. Se inicia el florecimiento de las lenguas y por lo tanto de las culturas. La historia de China y de Egipto se cuenta desde hace quince segundos, cinco segundos antes de las doce nace Jesucristo. Un segundo antes de las doce los cristianos inician el exterminio de las culturas americanas... Oh, ¡se oyen ya las campanadas! Ha llegado ya el año nuevo. ¿Qué nos traerá?»

Así resume Peter Kafka la historia del Universo, desde sus inicios hasta hoy. ¿Por qué ha sido así, y hacia dónde conduce? Probablemente esta cuestión es tan absurda como preguntarse sobre el Antes. Nos hemos acostumbrado en el mundo de la

vida cotidiana a preguntar por la causa, el sentido y la finalidad. No está claro qué significan estos conceptos para el Universo en su conjunto. Con ayuda de las leyes de la naturaleza conseguimos hacer algo más plausibles para nuestro cerebro los procesos del mundo material, incluso predecirlos ocasionalmente. No los hemos comprendido, suponiendo que esto signifique algo, y nuestro instrumento mental, la ciencia, es demasiado burdo para lo que hay más allá del mundo material.

Así pues, la ciencia moderna no puede responder a cuestiones que nuestra mente se plantea continuamente. Aunque estas cuestiones sean incomprensibles y quizá carezcan de lógica, han existido siempre. Hoy somos incapaces de responder a lo que escribió perplejo Angelus Silesius (1624-1677) cuando dijo con palabras que probablemente tienen su origen en la Edad Media:

> No sé quién soy.
> Vengo no sé de dónde y voy no sé a dónde.
> Me maravilla verme tan contento.

APÉNDICE

A. Frecuencia y longitud de onda

La figura A1 muestra en tres momentos consecutivos una onda que se desplaza a la velocidad de la luz. Empieza (arriba) en un lugar que llamamos «Salida» y en la parte inferior del dibujo alcanza la «Meta» al cabo de un segundo. Puesto que la luz recorre en un segundo 300.000 km, la distancia entre la salida y la meta será 300.000 km. La frecuencia indica cuántas cúspides de onda han pasado durante este segundo en el espacio entre la «Salida» y la «Meta». La distancia entre dos cúspides de onda es igual a la longitud de onda, por lo tanto el número de cúspides de onda multiplicado por la longitud de onda ha de ser igual a 300.000 km. Tenemos pues:

frecuencia × longitud de onda = velocidad de la luz.

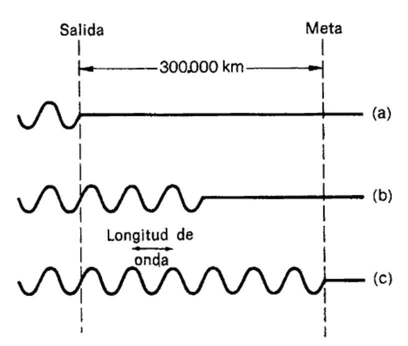


Fig. A1. El principio de un tren de ondas que se deslaza a la velocidad de la luz comienza en (a), el punto de partida, y llega a (c), la meta situada a 300.000 km de distancia.

En el dibujo la frecuencia es de seis oscilaciones por segundo, la longitud de onda es por lo tanto de 50.000 km. Si la longitud de onda fuera la de la Radiodifusión de Baviera en onda media, a saber 375 m, en cada segundo se desplazarían hacia la derecha desde el punto de salida 801.000 cúspides de onda.

Podemos suponer en la fórmula dada que la frecuencia se mide en Hz y la longitud de onda en m. La velocidad de la luz es de 300.000.000 m/s. Si medimos la frecuencia en MHz, la frecuencia en Hz será igual a un millón de veces la frecuencia en MHz. Nuestra ecuación será entonces:

1.000.000 × frecuencia en MHz × longitud de onda en m = 300.000.000.

es decir:

frecuencia en MHz × longitud de onda en m = 300.

B. Cómo se determina la distancia a las Híades

Utilizamos tres triángulos rectángulos, en los que dos lados permiten calcular el tercero, como aprendimos en la escuela. Desde nuestro punto de observación observamos un punto de convergencia de este grupo estelar, como explicamos en el texto. Conocemos pues la dirección de fuga y conocemos por lo tanto la dirección de la velocidad de una estrella de las Híades E (fig. B1). El efecto Doppler nos proporciona su velocidad radial. De este modo queda determinado completamente el triángulo gris de (a), puesto que conocemos un lado (la velocidad radial) y el ángulo en E, que es igual al ángulo medido desde O entre la estrella E y el punto de convergencia. Se deduce así la dirección y magnitud de la velocidad real. Se utiliza en (b) el mismo triángulo ya conocido para determinar la velocidad transversal a la visual. En (c) utilizamos la velocidad transversal a la visual que acabamos de calcular. Esta velocidad está dibujada en (c) a partir de E. Utilicemos ahora el movimiento propio determinado mediante la observación directa. Medimos la primera velocidad en pc por siglo, la segunda en segundos de arco por siglo. Tenemos así completamente determinado el triángulo gris de (c) y obtenemos la distancia de la estrella de las Híades al observador O.

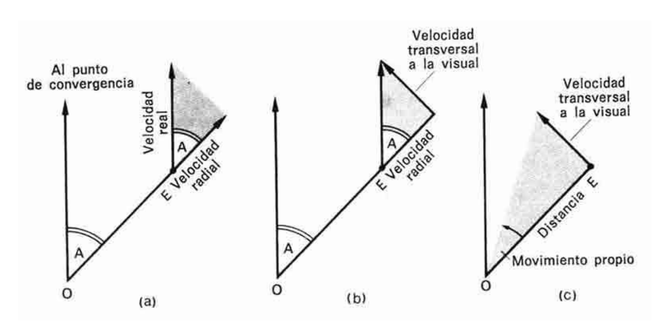


Fig. B1. Determinación en tres pasos de la distancia de una estrella E de las Híades a partir del ángulo A entre la estrella y el punto de convergencia, a partir de la velocidad radial y a partir del movimiento propio.

C. El Space-telescope y los paralajes de las estrellas

Los astrónomos efectúan con éxito mediciones de paralaje desde 1838; sin embargo, voy a usar el ejemplo del futuro Space-telescope para explicar el método. Si el lanzamiento al espacio en 1987 de este extraordinario instrumento astronómico no se vuelve a aplazar, el método de los paralajes experimentará un nuevo florecimiento. El principio está dibujado en la figura C1. Conocemos la distancia Sol-Tierra. La Tierra da una vuelta al Sol en el transcurso de un año, y a intervalos de medio año vemos una estrella relativamente próxima en dos direcciones distintas. La estrella vista desde nuestra situación se desplaza en relación a las estrellas del cielo situadas más lejos. El desplazamiento angular entre las dos direcciones, el llamado paralaje (en el dibujo está dibujada la situación de la Tierra el 1 de enero y el 1 de julio), permite determinar la distancia. En efecto, conocemos en el triángulo ABE los dos ángulos A y B y la distancia entre A y B. De estos datos derivan todos los demás: la distancia AE (o la distancia BE, que es prácticamente la misma si se tiene en cuenta la gran distancia a que está la estrella). Si el paralaje de una estrella es de un segundo de arco, decimos que la estrella se encuentra a una distancia de un parsec.

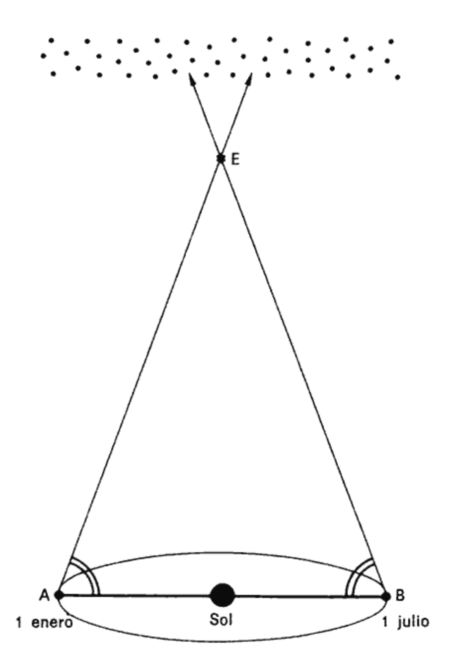


Fig. C1. El triángulo ABE se determina mediante el método de los paralajes. La minúscula diferencia entre las direcciones en que se ve la estrella lejana E desde A y B se obtiene observando el movimiento aparente de la estrella en relación a las estrellas del fondo, sugeridas en la figura.

Con este método puede medirse el espacio desde el fondo de la atmósfera terrestre hasta 10 pc, y hasta 100 pc si se aceptan errores mayores. El Space-telescope, que estará por encima de las perturbaciones de la atmósfera, permitirá multiplicar la precisión por diez.

No se necesitará entonces recurrir al punto de convergencia para determinar la distancia de las Híades, porque quedarán dentro del alcance del método de los paralajes. Cuando se pueda medir el espacio hasta 1 kpc se podrá determinar directamente la distancia de las estrellas RR Lyrae y de las cefeidas, y obtener así el punto cero de la relación período-luminosidad.

D. El método de la estima con distancias yuxtapuestas

Colón era un maestro de la estima. Todavía hoy navegan a estima desde los grandes buques hasta los pequeños yates. Es el más simple posible. Se zarpa del puerto de salida en una determinada dirección. Se determina el trayecto recorrido mediante la velocidad de marcha y el tiempo y se señala en la carta la dirección y longitud de este trayecto. Se tiene así la posición. Si se continúa navegando se añade la longitud y dirección del siguiente trayecto y se obtiene la segunda posición. Se van yuxtaponiendo así los trayectos recorridos y en la carta aparece una línea en zigzag en cuyo extremo se lee la posición actual. Esta yuxtaposición de líneas rectas tiene el inconveniente de que si se comete un error en un punto este error se propaga indefinidamente, de modo que al aumentar el número de trayectos yuxtapuestos el error aumenta continuamente. Pero Colón era un experto en el método, más que en la determinación astronómica de la posición. Todavía se sospecha hoy que Colón era incapaz de distinguir las estrellas más brillantes[20].

Cuando los astrónomos intentan navegar mentalmente hasta las fronteras del Universo utilizan también el método de la estima. Tiene el inconveniente, como la yuxtaposición marina, que los errores se propagan de modo indefinido. Esto explica que históricamente los errores cometidos al determinar la distancia de la nebulosa de Andrómeda hayan influido en la distancia de todas las galaxias más lejanas que ella. Baade duplicó la distancia de la nebulosa de Andrómeda (ver la pág. 101), y con ello aumentó simultáneamente todas las distancias entre las galaxias hasta la más lejana.

En el capítulo 4 y en el apéndice B se explica la manera de determinar la distancia de las Híades. Éste es el primer paso.

[20] Véase K. H. Peter, Wie Kolumbus navigierte. Herford 1972.

Se toman luego estrellas de determinadas propiedades espectrales en las Híades y se comparan con estrellas correspondientes de otros cúmulos estelares de nuestra galaxia. Si se admite que las estrellas con propiedades espectrales iguales tienen la misma luminosidad, podrá determinarse la distancia del cúmulo a partir de la distancia de las Híades. Éste es el segundo paso. Obsérvese que un error en las Híades falsifica también las distancias determinadas en el segundo paso. En algunos de estos cúmulos hay estrellas cefeidas, cuya relación período-luminosidad puede ahora calibrarse. Las estrellas cefeidas se ven hasta unos 4 Mpc. Las estrellas pulsantes nos ayudan en el tercer paso. Alcanzan hasta la nebulosa de Andrómeda, pero no hasta el cúmulo de Virgo. En las galaxias que pueden alcanzarse con el método de las cefeidas brillan novas de vez en cuando, se ven también en ellas estrellas brillantes e invariables y pueden reconocerse cúmulos globulares. Estos objetos constituyen fuentes de luz patrón muy útiles. Pueden observarse en otras galaxias hasta una distancia de 4 Mpc y se puede comprobar entonces si son patrones de luminosidad adecuados, puesto que la distancia de estas galaxias se determina también mediante las estrellas cefeidas. Las novas, las estrellas más brillantes y los cúmulos estelares una vez calibrados permiten sondear el cuarto paso. Este paso alcanza hasta 30 Mpc. Se determina así la distancia del cúmulo de Virgo. Para distancias mayores sirven de patrones de luminosidad las supernovas, calibradas también en las galaxias del cuarto paso. Con ellas puede alcanzarse hasta más lejos del cúmulo de la Cabellera (ver la pág. 190), es decir, a bastante más de 140 Mpc. Éste es el quinto paso. Se comprueba en el quinto paso que las galaxias elípticas más brillantes de los cúmulos galácticos medidos tienen todas con buena aproximación la misma luminosidad. Se toman estas galaxias como patrones de luminosidad. Y con ellas pueden alcanzarse en principio los 10.000 Mpc. Éste es el sexto y de momento último paso del método de las distancias yuxtapuestas. Cada paso es algo más inseguro que el anterior. Ya en el cuarto paso Tammann y Sandage siguen un camino distinto al de de Vaucouleurs.

Todo esto mejorará cuando se ponga finalmente en órbita el Space-telescope. Entonces podrán medirse directamente con el método de los paralajes las estrellas pulsantes, y en el cúmulo de Virgo podrán verse estrellas cefeidas y utilizarlas como indicadores de distancia. Con él se dispondrá de muchas más galaxias para calibrar otras fuentes patrón de luminosidad. El método de yuxtaposición tiene únicamente el inconveniente de que si se comete un error con un objeto próximo se propaga hasta el último rincón del Universo. Pero también tiene la ventaja de que la eliminación de un error en un objeto próximo mejora la fiabilidad de las grandes distancias.



¿Es el Universo infinitamente grande? ¿Tuvo un principio? ¿Qué había antes de este principio? El profesor Kippenhahn responde a estas preguntas y explica al lector de un modo gráfico y claro los conceptos más complicados de la moderna cosmología.
El autor ofrece una visión muy original del tema al presentar un personaje ficticio que acompaña al lector a lo largo del libro y cuyos sueños galácticos esclarecen muchos problemas complicados.
El lector vive el nacimiento de la radioastronomía en el año 1933, así como el hallazgo de los quasars treinta años después, el descubrimiento de la expansión del Universo en el año 1929 y el de la radiación de fondo cósmica.

El doctor Rudolf Kippenhahn fue profesor de Astronomía y Astrofísica en la Universidad de Gotinga de 1965 a 1974. En 1975 fue nombrado director del Instituto de Astrofísica de la Max-Planck-Gesellschaft, en Garching (Munich). Es coautor del libro de texto *Elementare Plasmaphysik* (*Física elemental del plasma*) y autor, entre otros, del libro *Cien mil millones de soles*, publicado en la Biblioteca Científica Salvat.